

Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand der hier vorliegenden Arbeit war die Untersuchung der Frage, inwieweit Methoden der virtuellen Realität dazu genutzt werden können, im Rahmen der Produktentwicklung komplexer mechatronischer Produkte das Potenzial digitaler Prototypen auszuschöpfen. Die dem digitalen Prototypen zugrundeliegenden Produktdaten sollen zielgerichtet dazu genutzt werden, die physikalischen Zusammenhänge und die das Produkt beschreibenden charakteristischen Eigenschaften mittels einer interdisziplinären Plattform für Functional Virtual Prototyping auf System- und Komponentenebene zu evaluieren.

Die in der virtuellen Szene geschaffene Immersion und Interaktion soll den Aufbau einer breiten gemeinsamen Wissensbasis aller beteiligten Entwickler erleichtern und den Prozess der Informationsaufnahme und Verarbeitung unterstützen.

Der gewählte Beispielaktuator mit seinen elektrischen, mechanischen und hydraulischen Komponenten stellt eine gute Basis dar, um die erzielten Ergebnisse auf weitere Produkte transferieren zu können. Gerade bei den in der Luftfahrt vorherrschenden kleinen Stückzahlen dient dies bei sinnvoller Anwendung der Vermeidung einer zeit- und kostenintensiven Prototypenherstellung.

Zu diesem Zweck wurden in Kapitel 2 die notwendigen Grundlagen recherchiert und darauf aufbauend das Konzept für den Aufbau einer virtuellen Produktentwicklung und die Nutzung von VR-Methodik erstellt. Die detaillierte Betrachtung der menschlichen Bewertungs- und Meinungsbildungsprozesse zeigt das Potenzial einer solchen Anwendung auf. Grundlage für eine virtuelle Produktentwicklung ist das virtuelle Produkt. Da im vorliegenden Fall eine durchgängige digitale Produktentwicklung nicht etabliert war, wurde im Rahmen dieser Arbeit die Entwicklung des Beispielactuators analysiert und modifiziert. Die in Kapitel 3 vorgestellten Anwendungsszenarien ermöglichen eine vollständig digitale Produktentwicklung im Wesentlichen durch den Einsatz eines Produktdatenmodells, eines Produktdaten-Managementsystems und neutraler Schnittstellen zwischen den Entwicklungswerkzeugen.

Eine gute analytische oder numerische Modellbildung ist für die Nutzung des digitalisierten Prozesses und der noch digitalen Prototypen unersetzlich. Messdaten zur Validierung der Modelle stehen zu einem frühen Zeitpunkt der Entwicklung im Allgemeinen noch nicht zur Verfügung, so dass die allein durch Simulationen generierten Daten zu den Produkteigenschaften und der Performance durchaus zu hinterfragen sind. Aus diesem Grund wurde für das bereits existierende Produkt eine vollständig digitale Modellbildung nachvollzogen (Kapitel 3). Es hat sich gezeigt, dass sich durch die Nutzung numerischer Verfahren ein sehr gutes Ergebnis erzielen lässt. Die nur in Form von Messdaten vorliegenden und nicht analy-

tisch herzuleitenden Eigenschaften wurden durch Ergebnisse von Simulationen mit *ANSYS* ersetzt und das Verhalten des virtuellen Gesamtmodells wurde erfolgreich gegenüber dem durch Messdaten identifizierten Gesamtmodell validiert.

Im Anschluss wurde das Konzept für die Umsetzung der virtuellen Evaluationsumgebung VAEE entwickelt, wobei die Randbedingungen aus den Grundlagen sowie der verfügbaren Hard- und Software berücksichtigt wurden. Die Interaktion wurde den Anforderungen an eine Evaluationsumgebung angepasst und es wurde ein Prozess definiert, mit dem die zu evaluierenden Testfälle generiert und dem VAEE zur Verfügung gestellt werden können. Die Durchführung der Evaluation sollte nach dem Classroom-Konzept erfolgen, d.h. es gibt einen Hauptbenutzer, der mittels HMD voll-immersiv in die Szene integriert ist und weitere Benutzer, die teil-immersiv über eine Projektionsleinwand und Shutter-Brillen eingebunden sind.

Anschließend wurden die Visualisierungsmodule zur Darstellung der Daten, Informationen und Simulationsergebnisse in VR konzipiert. Hier stand vor allem ein modularer Aufbau im Vordergrund, um die Anwendung in gewissen Grenzen flexibel zu halten. Die sich aus der Betrachtung der Grundlagen ergebenden Anforderungen wurden in diesem Zusammenhang eingearbeitet. Dem objektorientierten Ansatz folgend wurden die den Modulen hinterlegten Objektsimulationen weitestgehend in C++ programmiert. Die zur Umsetzung des VR-Anteils dieser Arbeit erstellten Strukturen wurden in das bereits bestehende Konzept der virtuellen Produktentwicklung eingebettet. Die Realisierung von Interaktionsmöglichkeiten eines Benutzers mit der virtuellen Szene spielt in diesem Zusammenhang eine wesentliche Rolle, da die Form der Umsetzung große Auswirkungen auf das Konzept hat.

Weiterhin wurde die Nutzbarkeit des erstellten Konzeptes untersucht. Hierzu wurden auf Basis bestehender Prozesse und Verfahren Versuchsreihen geplant und durchgeführt. Die aufgestellte Hypothese PH-1 (*„Mit steigender Immersion der Lernumgebung wird die Lernleistung verbessert“*) konnte durch die durchgeführten Versuche und Tests allerdings nicht bestätigt werden. Im Mittel waren die Ergebnisse der Testformulare nach dem VR-Versuch geringfügig besser als nach dem Kontrollversuch. Eine statistisch abgesicherte Aussage zugunsten des VR-Versuchs war nicht möglich, da die Unterschiede nicht signifikant waren.

Der zielgerichtete Einsatz von VR-Methoden erfordert für den vorliegenden Anwendungsfall eine sehr leistungsfähige Rechner-Hardware. Bis vor kurzem konnten die virtuellen Modelle nur durch kostenintensive Workstations in der erforderlichen Qualität dargestellt werden. Die genutzten SGI-Workstations besitzen eine sehr gute Grafikperformance, die Prozessoren sind aber bei weitem nicht mehr Stand der Technik. Zum Ende dieser Arbeit konnte die Evaluationsumgebung erfolgreich auf einen Linux-PC umgestellt werden. Die

neueste Generation der PC-Grafikkarten bietet eine deutlich gesteigerte Leistungsfähigkeit und insbesondere das Anti-Aliasing ist dem der SGI-Workstations fast ebenbürtig. Dies ist ein wichtiges Signal für weitere Arbeiten und Anwendungen auf dem VR-Sektor. Die notwendige PC-Hardware zur Realisierung einer VR-Umgebung, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wurde, kostet nur noch wenige tausend Euro und ist damit auch für kleinere Firmen und Forschungseinrichtungen verfügbar. Ein Problem bleibt die VR-Hardware auf dem Gebiet der Head-Mounted-Displays (HMD), der Tracking-Systeme bzw. der Datenhandschuhe. Die Preise für diese Geräte liegen nach wie vor auf sehr hohem Niveau und insbesondere die HMD bieten im unteren Preissegment keine für diese Anwendung ausreichende Performance. Die Auswertung der durchgeführten Versuche lässt den Schluss zu, dass ein nicht unwesentlicher Anteil der konzeptionellen Vorteile der umgesetzten FVP-Umgebung durch Einschränkungen des HMD gedämpft wird. Durch die Versuche validiert werden konnte hingegen das für die exemplarisch umgesetzte virtuelle Evaluationsumgebung VAEE entwickelte Interaktionskonzept sowie die Mensch-Maschine-Schnittstelle.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Gesamtkonzept dieser Arbeit einen guten Reifegrad erreicht hat. Die Vorteile einer VR-Einbindung in den Produktentwicklungsprozess konnten zumindest theoretisch aufgezeigt werden, wenngleich ein statistisch abgesicherter Nachweis nicht möglich war. Bei der Umsetzung der entwickelten Konzepte hat es sich als enorm aufwändig erwiesen, die für die Animation der virtuellen Geometrien notwendigen Objektsimulationen zu programmieren. Durch einen modularen und objekt-orientierten Ansatz wurde der Versuch unternommen, die Umgebung auch für alternative Produkte nutzbar zu machen, jede tiefergehende Änderung wird jedoch mit großem programmiertechnischem Aufwand verbunden sein.

Als wichtigste Ansatzpunkte für zukünftige Entwicklungen und Arbeiten kann man eine leistungsfähigere VR-Hardware (insbesondere das HMD) nennen sowie das grundlegende Überdenken der VR-Software. Konzeptionelle Vorteile der virtuellen Funktionsprüfung gegenüber konventionellen Verfahren können frühestens dann statistisch nachgewiesen werden, wenn die genannten Beeinträchtigungen durch die VR-Hardware ausgeräumt werden.

Anhang A

Dokumentation und Auswertung der durchgeführten Versuche

A.1 Statistische Grundlagen der Versuchsauswertung

A.1.1 Korrelationskoeffizient nach Pearson

Korrelationen beschreiben den Zusammenhang zwischen zwei Variablen. Die Berechnung gründet sich auf der Bildung von Wertepaaren, die aus zugrundeliegenden abhängigen Stichproben gebildet werden [BZ00]. Der Korrelationskoeffizient r symbolisiert die Stärke des Zusammenhangs. Er liegt stets im Bereich $-1 < r < 1$. Eine verbale Beschreibung dieses Wertes gibt [BZ00]:

Wert	Interpretation
bis 0.2	sehr geringe Korrelation
bis 0.5	geringe Korrelation
bis 0.7	mittlere Korrelation
bis 0.9	hohe Korrelation
über 0.9	sehr hoheKorrelation

Der Korrelationskoeffizient nach Pearson eignet sich für intervallskalierte und normalverteilte Variablen. Er wird nach der folgenden Formel berechnet:

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(n - 1) \cdot s_x \cdot s_y} \quad (\text{A.1})$$

Hierbei sind x_i und y_i die Werte der beiden Variablen, \bar{x} und \bar{y} deren Mittelwerte und s_x bzw. s_y deren Standardabweichung. Die Anzahl der Wertepaare wird mit n bezeichnet.

Die statistischen Berechnungen werden mit Hilfe der Statistiksoftware SPSS 10.0 durchgeführt.

A.1.2 t-Test

Der Vergleich von Mittelwerten verschiedener Stichproben gehört zu den Standardverfahren der statistischen Analysen. Es soll geklärt werden, ob sich die gegebenenfalls auftretenden Mittelwertsunterschiede durch zufällige Schwankungen erklären lassen oder nicht [BZ00]. Zur Prüfung auf Unterschiede zwischen Mittelwerten bei kleinen Stichproben kommt der t-Test zum Einsatz [Sah93]. Hierfür wird vorausgesetzt, dass die Bedingung der Normalverteilung in der Grundgesamtheit erfüllt ist. Bei kleinen Stichproben wird es für die Schätzung des Standardfehlers auch bedeutsam, ob die Varianzen gleich oder ungleich sind. Die nachfolgenden Beschreibungen des t-Test sind in weiten Teilen Sahner [Sah93] entnommen. Im Rahmen der Auswertung mit SPSS 10.0 werden beide Ergebnisse (für gleiche bzw. für ungleiche Varianzen der Verteilungen) ermittelt.

A.1.2.1 t-Test für gleiche Varianzen ($\sigma_{x1}^2 = \sigma_{x2}^2$)

Bei gleichen Varianzen wird die Standardabweichung der Verteilung der Stichprobendifferenzen nach folgender Formel geschätzt:

$$\hat{\sigma}_{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)} = \sqrt{\frac{n_1 s_{x1}^2 + n_2 s_{x2}^2}{n_1 + n_2 - 2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}} \quad (\text{A.2})$$

Die beiden Standardabweichungen s_{x1} und s_{x2} werden mit dem entsprechenden Stichprobenumfang gewichtet. Der kritische Quotient wird entsprechend wie folgt gewichtet:

$$t = \left| \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{n_1 s_{x1}^2 + n_2 s_{x2}^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \frac{n_1 + n_2}{n_1 \cdot n_2}}} \right| \quad (\text{A.3})$$

Die Freiheitsgrade df ergeben sich aus der Addition von n_1 und n_2 , vermindert um zwei, da zur Berechnung der Standardabweichungen jeweils ein Freiheitsgrad verloren geht.

A.1.2.2 t-Test für ungleiche Varianzen ($\sigma_{x1}^2 \neq \sigma_{x2}^2$)

Für den Fall, dass die Varianzen der Verteilungen ungleich sind, oder Hinweise dafür vorliegen sollten, kann zur Schätzung des hypothetischen Standardfehlers nicht Gleichung A.3 herangezogen werden. Statt dessen wird die folgende Gleichung verwendet (Gleichung A.4)

$$\hat{\sigma}_{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2)} = \sqrt{\frac{s_{x1}^2}{n_1 - 1} + \frac{s_{x2}^2}{n_2 - 1}} \quad (\text{A.4})$$

Dieser Ansatz wird vor allem dann verwendet, wenn die bei großen Unterschieden in den Varianzen der Grundgesamtheiten beide Stichprobenumfänge n_1 bzw. n_2 unterschiedlich groß sind. Der kritische Quotient wird dann wie folgt berechnet [Sah93]:

$$t = \left| \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{s_{x1}^2}{n_1 - 1} + \frac{s_{x2}^2}{n_2 - 1}}} \right| \quad (\text{A.5})$$

Gleichung A.5 stellt gegenüber Gleichung A.3 eine weniger verlässliche Schätzung des Standardfehlers dar, insbesondere, wenn die beiden Stichprobengrößen unterschiedlich sind. Je nachdem, ob n_1 oder n_2 kleiner ist, bekommt der erste oder der zweite Summand unter der Wurzel von Gleichung A.4 das größere Gewicht. Damit wird gerade die Standardabweichung bedeutsam, die auf das kleinere n zurückgeht. Um diese Schwäche auszugleichen, wird bei ungleichem n eine andere Art der Berechnung der Freiheitsgrade gewählt. Es kommt die Korrekturformel Gleichung A.6 zum Einsatz:

$$df = \frac{\left[\frac{s_{x1}^2}{n_1 - 1} + \frac{s_{x2}^2}{n_2 - 1} \right]^2}{\frac{\left[\frac{s_{x1}^2}{n_1 - 1} \right]^2}{n_1 + 1} + \frac{\left[\frac{s_{x2}^2}{n_2 - 1} \right]^2}{n_2 + 1}} - 2 \quad (\text{A.6})$$

A.2 Unterlagen zur Durchführung der Versuche

1. Unterlagen zur Versuchsvorbereitung
 - Einleitung (2 Seiten)
 - Flussdiagramm (1 Seite)
 - Grundlagen Seitenruderaktuator (4 Seiten)
2. Versuchsunterlagen
 - Einweisung (3 Seiten)
 - Kontrollversuch (19 Seiten)
3. Fragebögen
 - Fragebogen I (1 Seiten)
 - Fragebogen II (2 Seiten)
4. Testformulare
 - Testformular I (3 Seiten)
 - Testformular II (3 Seiten)

Einleitung

Auf den folgenden Seiten wird Ihnen ein kurzer Überblick über das Ziel dieser Versuchsreihe und den Ablauf der Tests gegeben. Bitte lesen Sie die folgenden Seiten sorgfältig durch. Sie sollten die Unterlagen innerhalb von 10 Minuten durcharbeiten.

Ziel

Ziel dieser Versuchsreihe ist es, die Einflüsse einer immersiven Lernumgebung auf das Erkennen und Verarbeiten von Daten und Informationen zu untersuchen. Die zu untersuchende Lernumgebung nutzt immersive VR-Technologien, d.h. der Benutzer taucht in eine virtuelle Welt ein. Das verwendete Lernobjekt ist ein elektrohydraulischer Seitenruderaktuator, welcher im Verlauf kurz charakterisiert wird.

Als Vergleichsumgebung wird eine gängige Lernumgebung genutzt, in der die Daten und Informationen auf Papier dargestellt werden. Verglichen wird das Wissen um Eigenschaften und Zusammenhänge rund um den Seitenruderaktuator. Hierzu werden nach dem Durchlaufen der zwei Versuchsphasen jeweils Testaufgaben zu lösen sein. Die in diesen Tests erreichte Punktzahl soll das produktbezogene Wissen und das Verständnis für die Zusammenhänge abbilden.

Ablauf

Der Test wird insgesamt etwa 1.5 Stunde in Anspruch nehmen. Zusammen mit diesem Text erhalten Sie eine schriftliche Zusammenstellung der grundlegenden Eigenschaften und Funktionalitäten des in den Tests betrachteten Seitenruderactuators (Grundlagen Seitenruderaktuator). Mit Hilfe dieser Basisinformationen soll ein Basiswissen zur Verfügung gestellt werden, auf dem eine weitere Wissensakquisition im Rahmen der Versuche aufbauen kann.

Als erstes müssen Sie Einschätzungen bezüglich ihrer Stimmung und Ihrer Leistungsfähigkeit vornehmen. Dies dient dazu, Ausreißer in der Statistik besser lokalisieren zu können.

Im Anschluss daran werden Sie einen Fragebogen I ausfüllen. In diesem werden allgemeine Informationen zu Ihrer Person, Ihrem persönlichen Befinden, Erfahrung mit VR und evtl. vorhandenes thematisches Vorwissen erfragt.

Kern der Überprüfung sind zwei Versuche (Versuch A und Versuch B):

Frage 1: Daten und Informationen werden auf Papier dargestellt. Die Versuchsperson soll Zusammenhänge erkennen und verarbeiten.

(Dauer 20 Minuten)

Frage 2: Daten und Informationen werden mit Hilfe immersiver VR-Technologie dargestellt. Die Versuchsperson soll Zusammenhänge erkennen und verarbeiten.

(Dauer 20 Minuten)

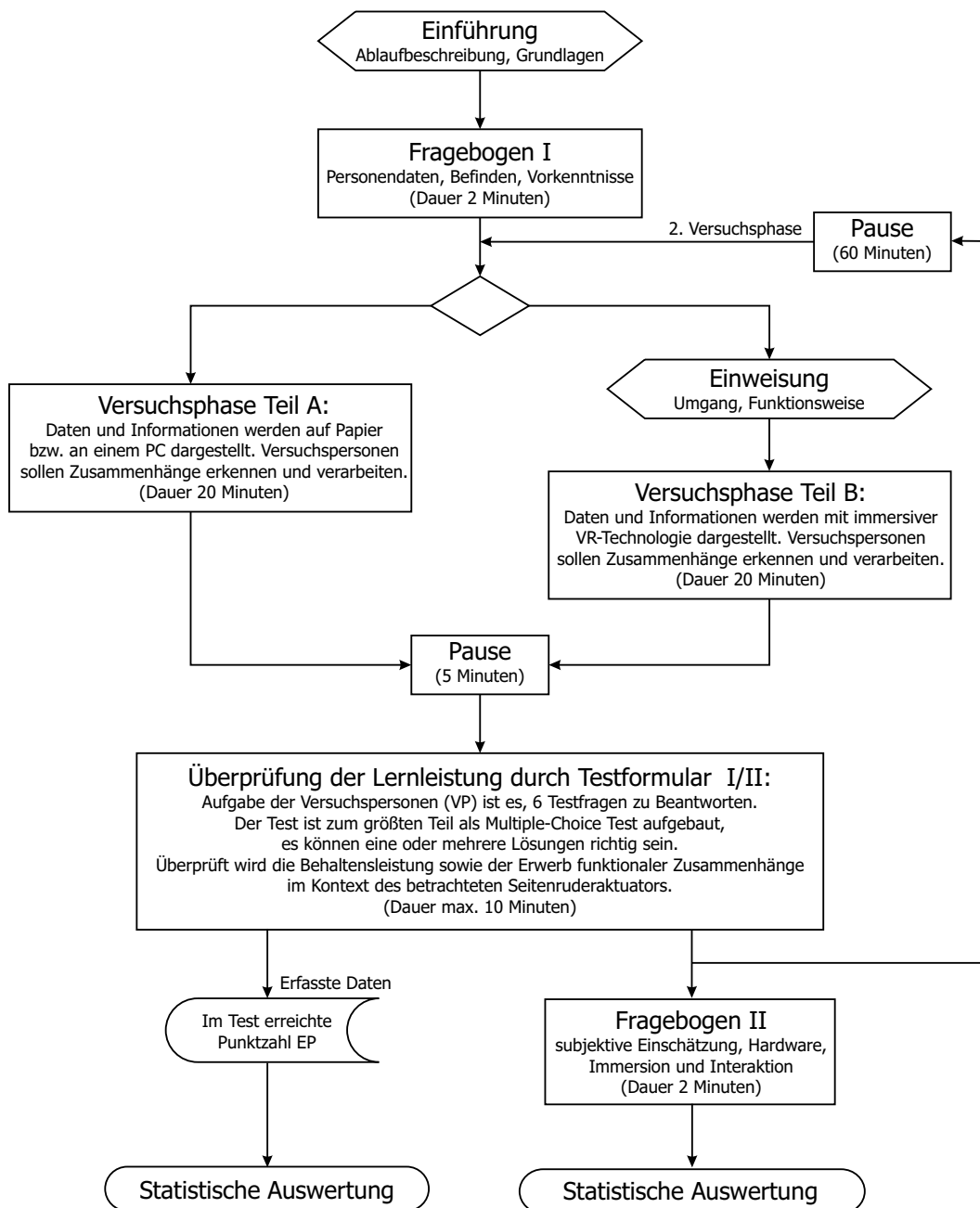
Nach dem Zufallsprinzip wurde entschieden, welchen Versuch Sie zuerst durchführen. Vor der Durchführung des VR-Versuchs wird Ihnen eine schriftliche Einweisung ausgehändigt. In dieser Einweisung werden die Versuchsumgebung und die Funktionalitäten näher erklärt. Sie haben im Versuch 20 Minuten Zeit so viele Informationen und Zusammenhänge wie möglich zu erfassen. Nach einer kurzen Pause wird Ihnen dann ein Test vorgelegt, den Sie bearbeiten sollen. Es wurden 2 Tests mit je 6 Fragen zusammengestellt (Testformular I bzw. Testformular II). Nach dem Zufallsprinzip wurde Ihnen zunächst einer der Tests zugewiesen.

Nach einer Pause von 60 Minuten werden Sie den zweiten Versuch durchführen und im Anschluss an eine 5-minütige Pause den zweiten Test ausgehändigt bekommen. Für die Beantwortung der Testfragen stehen Ihnen jeweils 10 Minuten zur Verfügung.

Nach der Beendigung der Tests sollen Sie einen letzten Fragebogen ausfüllen. Mit dessen Hilfe werden subjektive Einschätzungen zu Hardware, Software, Immersion und Interaktion gewonnen. Der Ablauf ist zusammenfassend auf der nächsten Seite in Form eines Flussdiagramms dargestellt.

Bitte beantworten Sie alle Fragen ehrlich. Die Daten werden anonymisiert gesammelt und vertraulich behandelt.

Flussdiagramm zum Versuchsablauf



Grundlagen Seitenruderaktuator

Der betrachtete elektrohydraulische Seitenruder-Aktuator eines modernen Fly-by-Wire-Flugzeuges ist das Bindeglied zwischen Flight-Control-Computer (FCC) und der aerodynamischen Steuerfläche Seitenruder. Der Aktuator befindet sich im sicherheitskritischen Pfad der Flugregelung und ist dementsprechend mit einem ausreichenden Redundanzkonzept ausgestattet, d.h. die Systemkomponenten sind unter Umständen mehrfach parallel vorhanden:

- Die Hydraulikkomponente ist mit zwei unabhängigen Hydraulikversorgungen duplex redundant ausgelegt.
- Aufgrund der hohen Fehleranfälligkeit ist das elektrische Teilsystem quadruplex redundant ausgelegt (je 4 Wegsensoren, Stromsensoren und Motorspulen).

Funktionsprinzip

Das System besteht aus drei Baugruppen: einem Linearmotor, einem Hydraulikventil und einem Hydraulikzylinder (siehe Abbildung 1). Der Linearmotor ist mit vier Spulen ausgestattet. Werden die Spulen bestromt, wird auf den Anker eine Kraft in achsialer Richtung erzeugt, die vom Betrag und vom Vorzeichen des Stroms abhängt. Diese Kraft bewegt den auf der gleichen Achse befindlichen Ventilschieber des Hydraulikventils.

Das Hydraulikventil hat die Aufgabe die Flüsse des Hydrauliköls zu den Kammern des Zylinders zu kontrollieren. Steht der Ventilschieber in der Nullposition ($y = 0$) fließt vereinfachend gesehen kein Öl zum Zylinder. Dieser wird sich folglich nicht bewegen – vereinfachend gesehen auch nicht unter Last. Je nach Richtung und Größe der Auslenkung des Ventilschiebers werden die Kammern des Zylinders mit einem von der Last am Zylinder abhängigen Volumenstrom von Hydrauliköl versorgt.

Die Kraft zur Betätigung der Steuerfläche wird durch die unter Druck stehende Hydraulikflüssigkeit in den Kammern und die Kolbenfläche erzeugt:

$$F_{Kammer} = P_{Kammer} \cdot A_{Kolben} \quad (\text{A.7})$$

$$F_{hydraulisch} = \sum_{i=1}^4 F_{Kammer_i} \quad (\text{A.8})$$

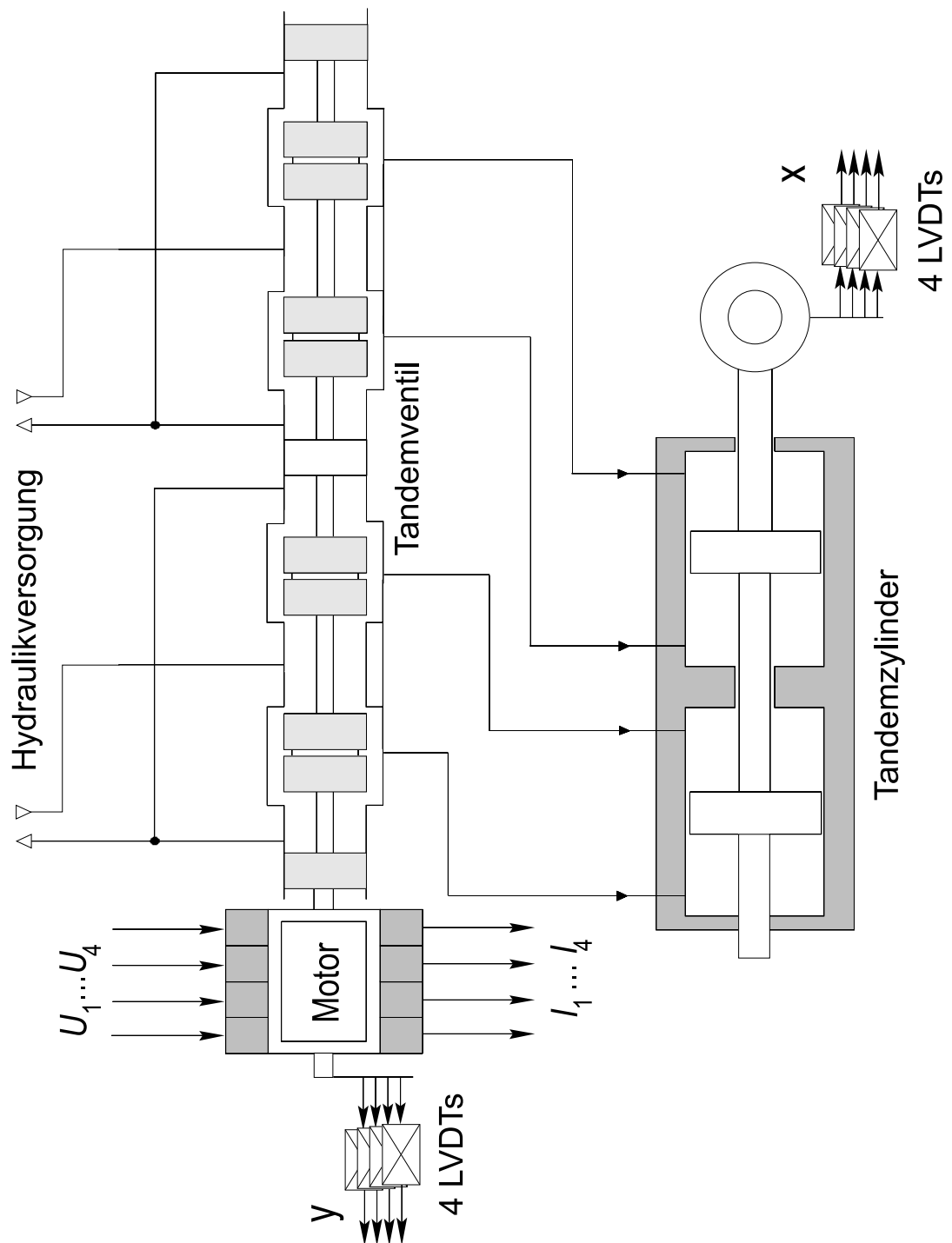


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Aktuators

Performancemodell

Das Performancemodell als zentrales Modell zur Simulation des statischen und dynamischen Verhaltens des Aktuators ist das wichtigste Instrument zur Bewertung und Beurteilung des Produktverhaltens.

In den bevorstehenden Versuchen sind die Ergebnisse von Simulationen der Performance des Seitenruderaktuators unter verschiedenen Bedingungen auf unterschiedliche Weise dargestellt. Allen Simulationen gleich sind die beinhalteten Grundinformationen:

- Sollposition des Zylinders x_{soll}
- Istposition des Zylinders x_{ist}
- Position des Ventilschiebers y
- Spulenstrom I
- Volumenströme vom Ventil zum Zylinder Q_i
- Druck in den Zylinderkammern P_i
- Last am Zylinder
- resultierende Kraft am Kolben des Zylinders F_x
- resultierende Kraft am Ventilschieber F_y
- Geschwindigkeit des Kolbens des Zylinders \dot{x}
- Geschwindigkeit des Ventilschiebers \dot{y}

Die dargestellten Testfälle ergeben sich durch unterschiedliche Sollvorgaben für den Zylinderweg (z.B. Sprung oder Sinusschwingung) und die Last am Zylinder.

Elektromagnetische Eigenschaften des Linearmotors

Zusätzlich zu den oben aufgelisteten Informationen werden die elektromagnetischen Eigenschaften des Motors dargestellt. Die wichtigsten Kenngrößen sind in diesem Zusammenhang die elektrische Feldstärke H und die magnetische Flußdichte B . Die Feldstärke ist primär abhängig von der Bestromung der Spulen, die sich damit ergebende Flußdichte wiederum hängt vom Material des Eisenkreises ab, der die magnetischen Flüsse leitet.

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (\text{A.9})$$

$$\mu_r = f(H) \quad (\text{A.10})$$

Der Faktor $\mu_0 \cdot \mu_r$ entspricht der Steigung in der B/H-Kurve Abbildung 2.

Im vorliegenden Fall hat das Material nichtlineare Eigenschaften, was bedeutet, dass ab einer gewissen Feldstärke die Flussdichte nicht mehr im gleichen Maße ansteigt wie im nicht-gesättigten Zustand (siehe Abbildung 2).

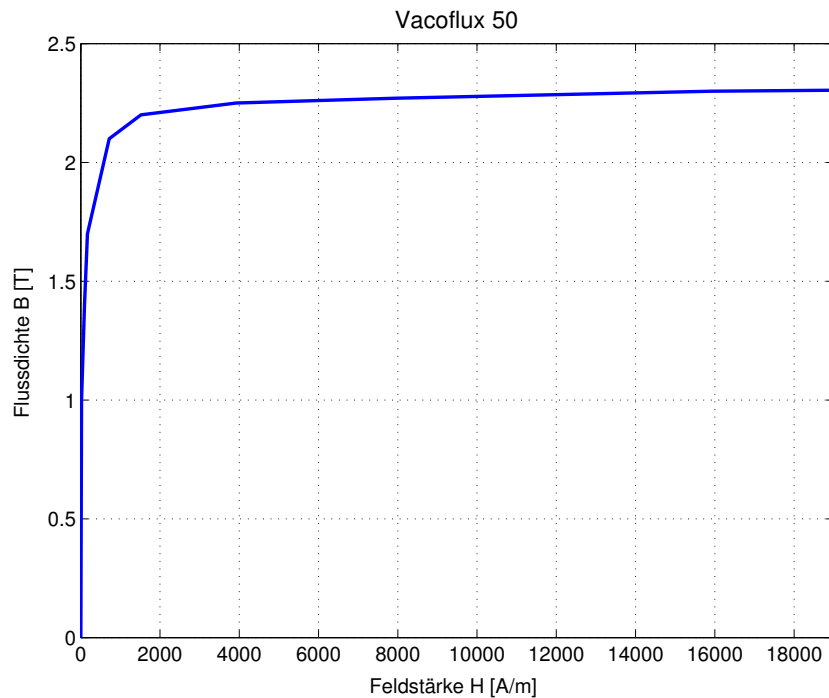


Abbildung 2: Nichtlineares Materialverhalten

Da die elektromagnetisch aufgebrachte Kraft proportional zur magnetischen Flussdichte B ist, wird die Effizienz des Motors bei höheren Feldstärken reduziert, die magnetische Flussdichte und die Motorkraft gehen „in Sättigung“.

Einweisung

Der Umgang mit der virtuellen Testumgebung und insbesondere die Interaktion erfordert eine kurze Erklärung dessen, was Sie als Versuchsperson erwarten wird.

Umgang mit der virtuellen Testumgebung

Die virtuelle Testumgebung wird als computergenerierte Szene auf einem PC gerechnet. Wie bei realen Systemen mit denen Sie arbeiten, erfolgt die Interaktion mit der Umgebung über Ein- bzw. Ausgabegeräte.

Ausgabegeräte: Das wichtigste Ausgabegerät ist das so genannte Head Mounted Display (HMD). Dieses liefert ein stereoskopisches Abbild der computergenerierten virtuellen Szene. Sie sollten demzufolge einen 3D-Eindruck erfahren.

Wenn Sie sich die Szene betrachten werden Sie feststellen, dass neben der virtuellen Testumgebung ein virtuelles Pendant Ihrer rechten Hand visualisiert wird. Die Darstellung der virtuellen Hand wird analog der Position und Orientierung im Raum animiert.

Eingabegeräte: Die Eingabegeräte ermöglichen primär die Animation der virtuellen Hand des Benutzers sowie die Anpassung der virtuellen Szene an die Position und Blickrichtung des Kopfes des Benutzers.

Die Positionen und Orientierungen von Kopf und Hand wird über ein Tracking-System detektiert, welches auf der Hand bzw. auf dem HMD befestigt wurde. Die Stellung der Finger wird durch einen Datenhandschuh sensiert, der vom Benutzer an der rechten Hand getragen wird.

Die eigentliche Interaktion mit den Bedienelementen in der virtuellen Testumgebung erfolgt über das Drücken von virtuellen Druckschaltern mittels der Fingerspitze des Zeigefingers der virtuellen Hand. Sobald die Geometrie der Hand die Geometrie der Druckschalter durchschneidet, wird die entsprechend zugewiesene Aktion durchgeführt.

Funktionsweise des virtuellen Schaltpultes

Die Interaktionsmöglichkeiten, welche durch das Schaltpult realisiert sind, umfassen zwei Funktionsfelder:

Frage 1: Auswahl eines der zur Verfügung stehenden Konfigurationsdateien (Testfälle)

Frage 2: Konfigurieren der Darstellung

Der **linke Teil** des Pultes beinhaltet die Auswahl von einem der 5 zur Verfügung stehenden Testfälle. Jeder Testfall versorgt die aktiven Visualisierungsmodule in der Testumgebung konsistent mit Daten für eine bestimmte Simulation.



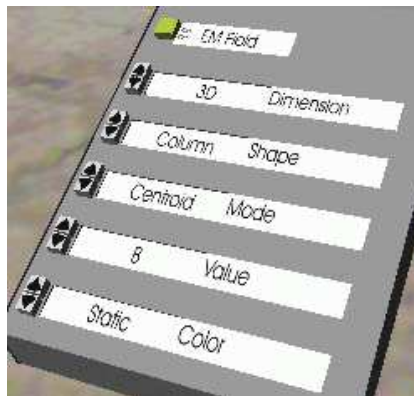
Die voreingestellt verfügbaren Testfälle sollen es dem Benutzer ermöglichen, sich spezifische Zusammenhänge zur Funktionsweise und zu den Abhängigkeiten der Baugruppen Motor, Ventil und Zylinder zu machen. Die Farbe der Druckschalter assoziiert folgende Schaltzustände:

- grün \equiv Datensatz steht zur Verfügung
- gelb \equiv Datensatz wird geladen
- rot \equiv Datensatz ist aktiv

Rechts neben der Auswahl der Konfigurationsdateien befinden sich verschiedene Module zur Einstellung von Eigenschaften und Werten für Parametern. Wichtigstes Element ist die Zeitskalierung: durch eine Erhöhung des Wertes wird die Darstellung ähnlich einer Zeitlupe verlangsamt, wodurch Zusammenhänge leichter erfasst werden sollen.



Im **mittleren Teil** des Schaltpultes können Einstellungen vorgenommen werden, die die Darstellung der elektromagnetischen Eigenschaften des Linearmotors verändern. Alternativ kann als Wert die Feldstärke H , die Flussdichte B oder die Permeabilität des Materials $\frac{B}{H}$ (\rightarrow Sättigung) dargestellt werden. Die Interaktion erfolgt durch eine Berührung der virtuellen Druckschalter mit der Fingerspitze.



Auf dem **rechten Teil** des Schaltpultes sind die Knöpfe zum Ein- bzw. Ausblenden von Visualisierungsmodulen angeordnet. Durch das Ausblenden von Modulen kann die Konzentration auf einen bestimmten Zusammenhang gelenkt werden. Darüber hinaus wird die Gesamtsimulation weniger belastet - die Darstellung der virtuellen Szene wird im Allgemeinen flüssiger werden.



Die Rückmeldung über den Schaltzustand liefert wieder die Farbe der Knöpfe:

- rot \equiv eingeblendet
- grau \equiv ausgeblendet

Die Schalter zum Ein- und Ausblenden der Module führen Funktionalitäten direkt aus. Alle anderen Einstellungen werden erst vorgenommen und dann durch das Drücken des Apply-Knopfes ausgeführt!



Kontrollversuch

In den vorliegenden Unterlagen finden sich die zur Lösung der Testaufgaben notwendigen Daten und Informationen. Versuchen Sie sich einen möglichst guten Überblick über die Zusammenhänge zwischen den Zuständen und Baugruppen zu verschaffen.

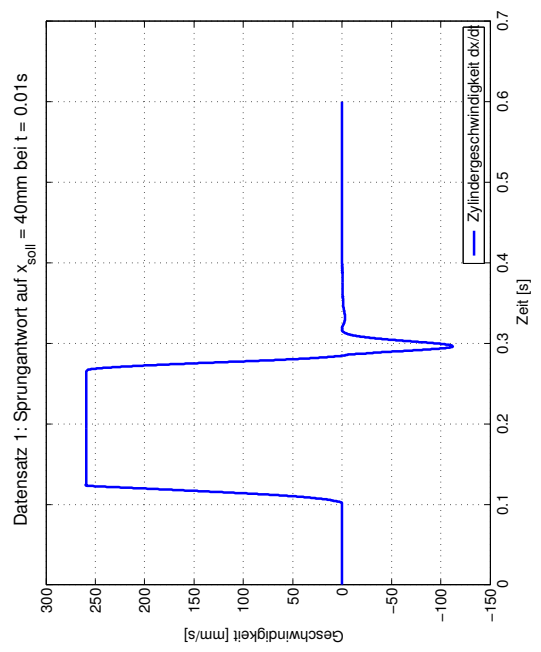
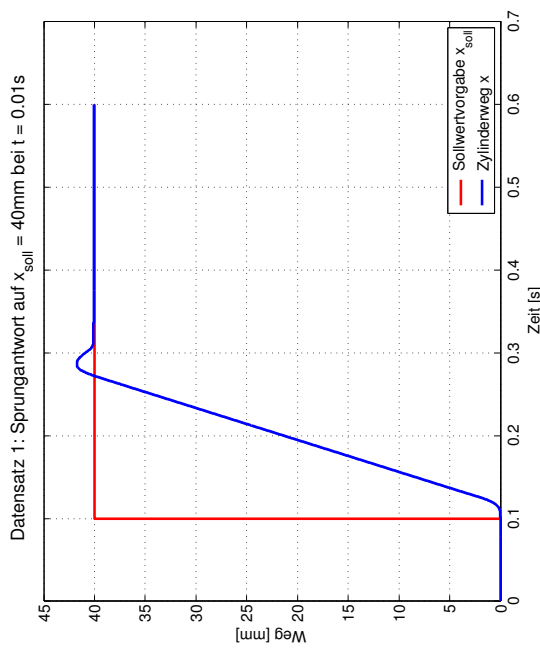
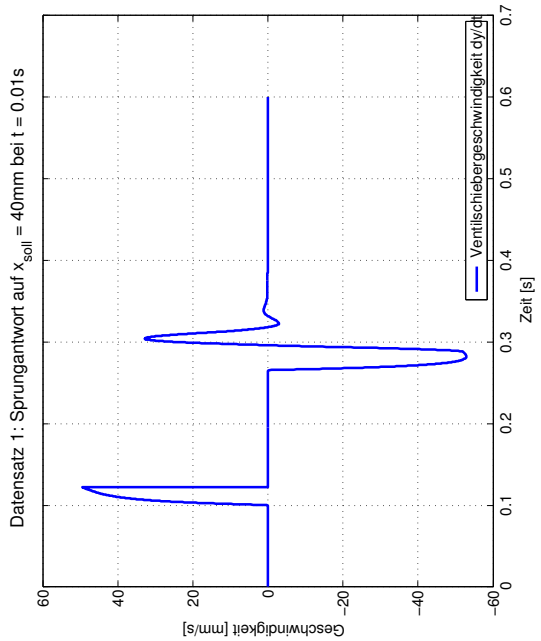
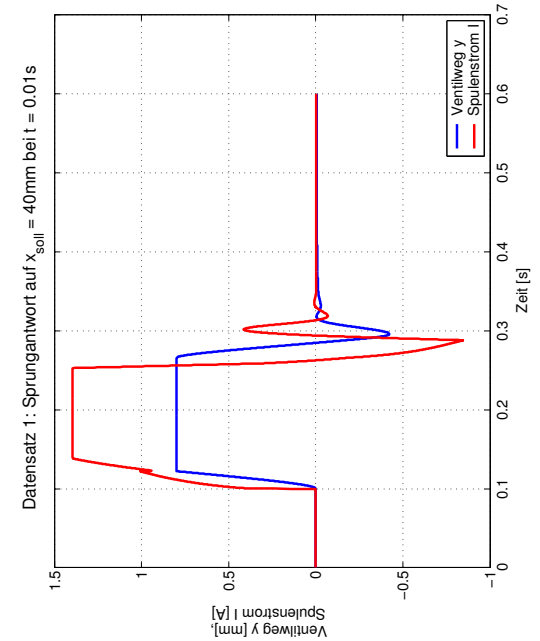
Wie beim Versuch mit Hilfe der immersiven VR-Testumgebung lassen sich die Daten und Informationen wie folgt gliedern:

- Schnittdarstellung der Baugruppen Motor, Ventil und Zylinder(1 Seite)
- Simulationsergebnisse aus Matlab/Simulink (Testfälle 1 ÷ 5, 10 Seiten)
- Simulationsergebnisse der elektromagnetischen Feldrechnung mit Ansys (Plots der magnetischen Flussdichte B, 3 Seiten)
- Simulationsergebnisse der elektromagnetischen Feldrechnung mit Ansys (Plots der magnetischen Feldstärke H, 3 Seiten)

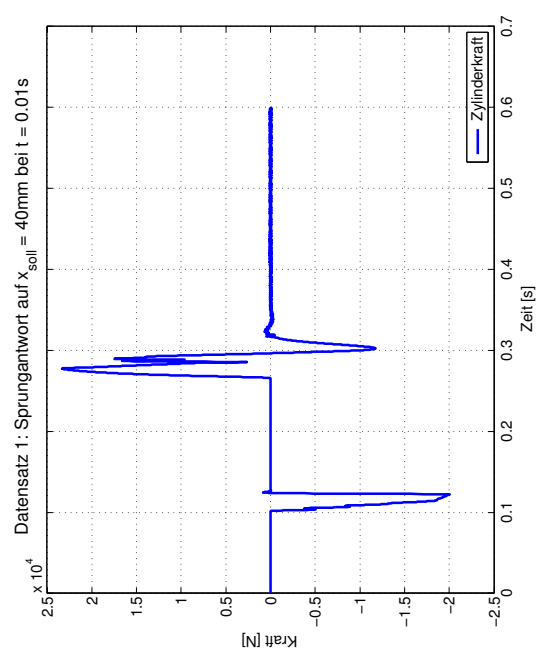
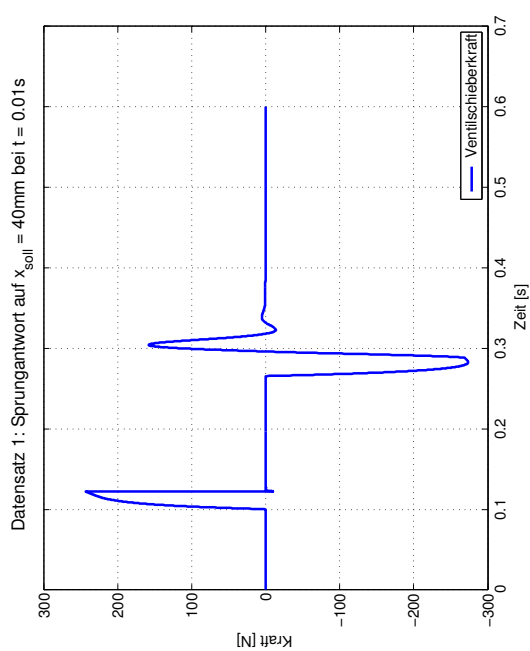
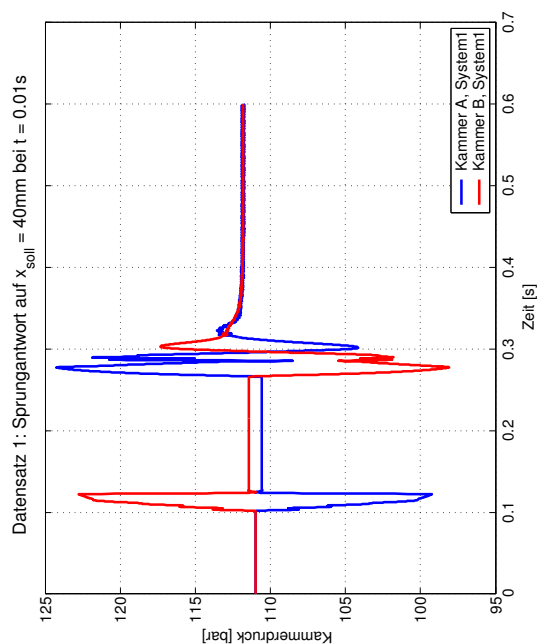
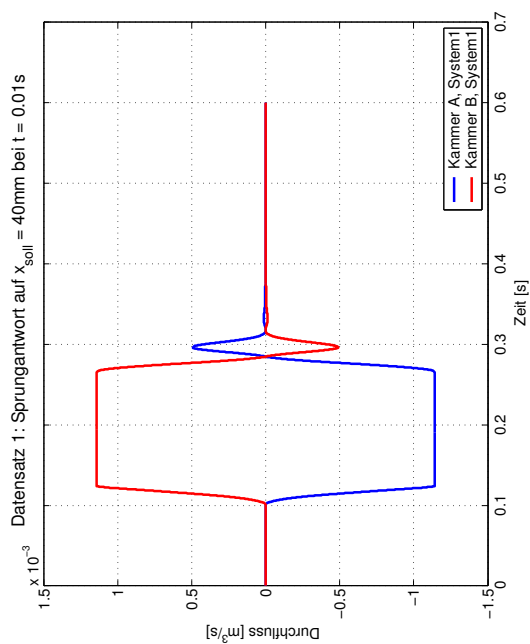
Testfälle

Datensatz 1:	Systemzustand:	vollständiges System
	Anregung:	Sprung
	Amplitude:	40 mm
	Last:	1000 kg
Datensatz 2:	Systemzustand:	vollständiges System
	Anregung:	Sprung
	Amplitude:	40 mm
	Last:	1000 N
Datensatz 3:	Systemzustand:	vollständiges System
	Anregung:	Sinusschwingung
	Frequenz:	5 Hz
	Amplitude:	20 mm
	Last:	1000 kg
Datensatz 4:	Systemzustand:	vollständiges System
	Anregung:	Sinusschwingung
	Frequenz:	1 Hz
	Amplitude:	20 mm
	Last:	1000 kg
Datensatz 5:	Systemzustand:	1 elektr. Fehler (1 Spule defekt)
	Anregung:	Sprung
	Amplitude:	40 mm
	Last:	1000 kg

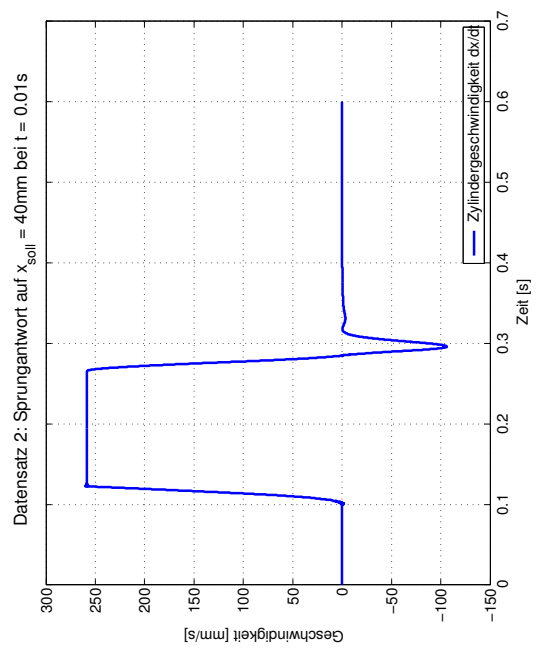
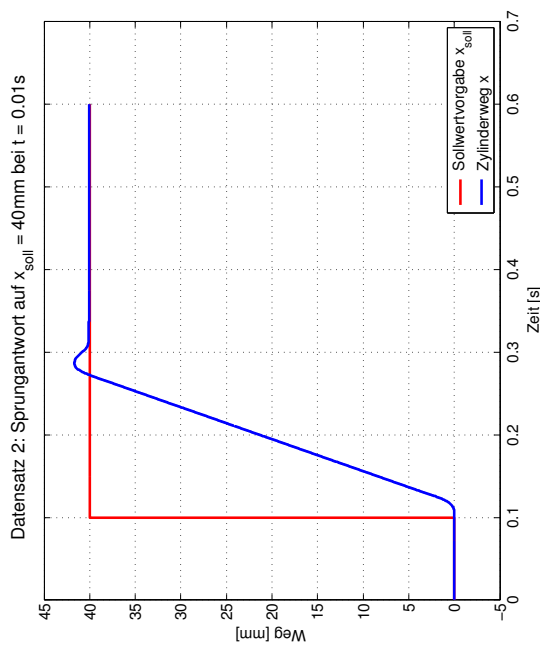
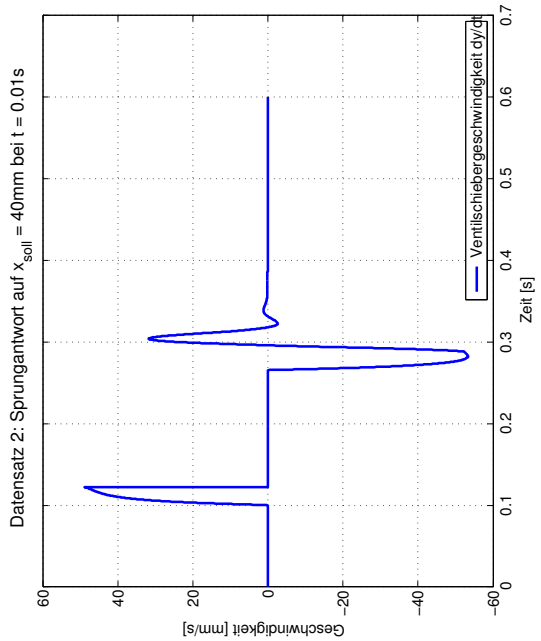
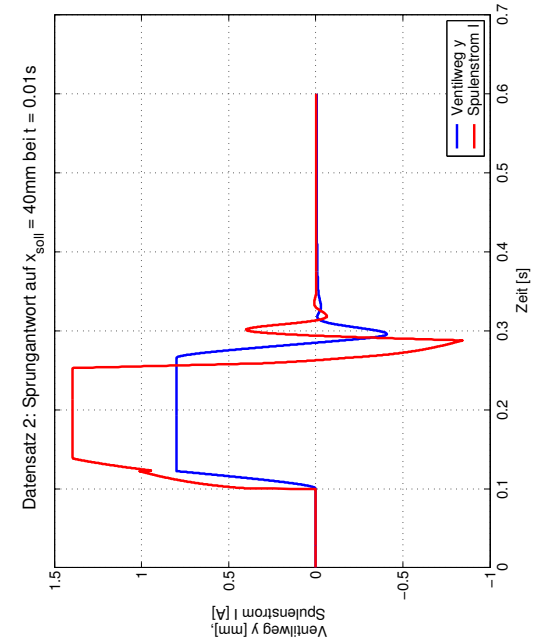
Datensatz 1



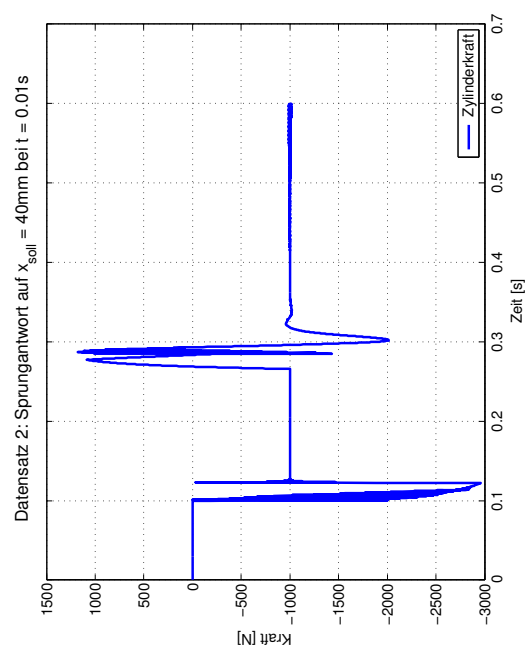
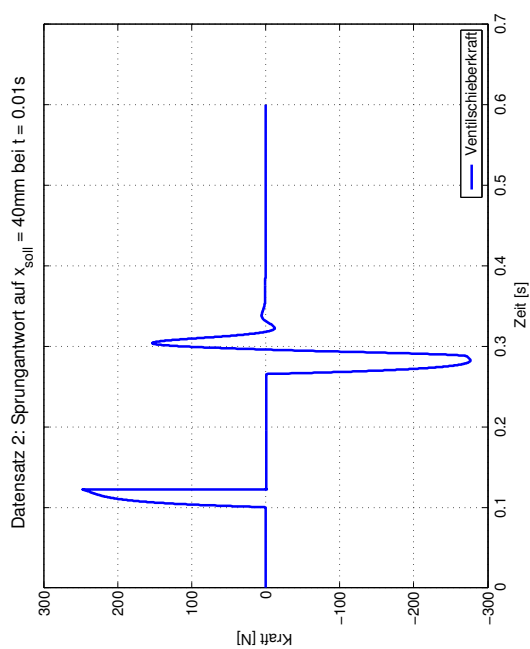
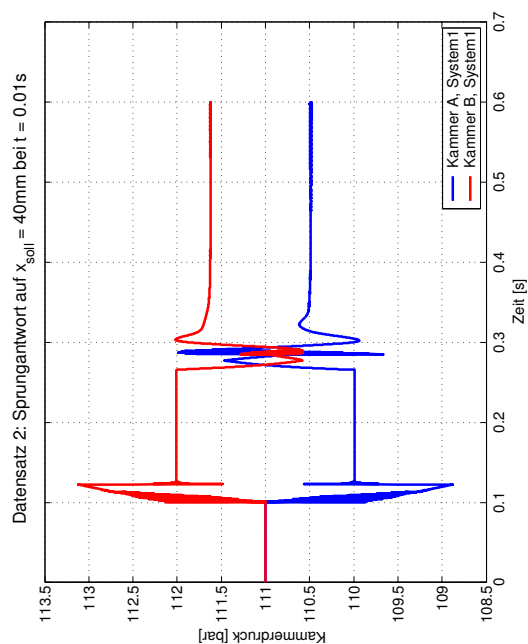
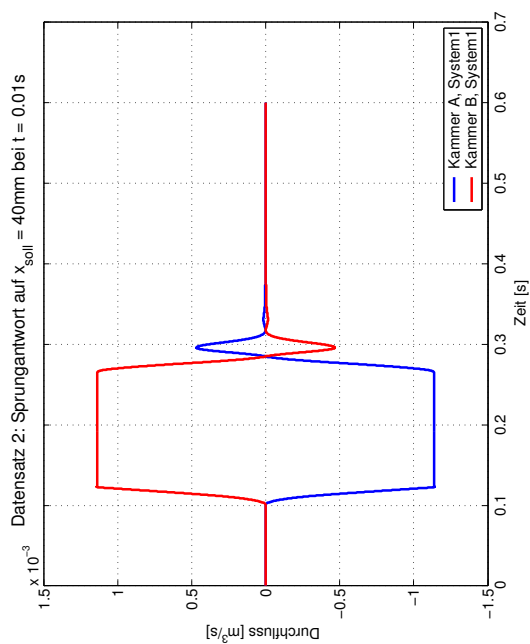
Datensatz 1



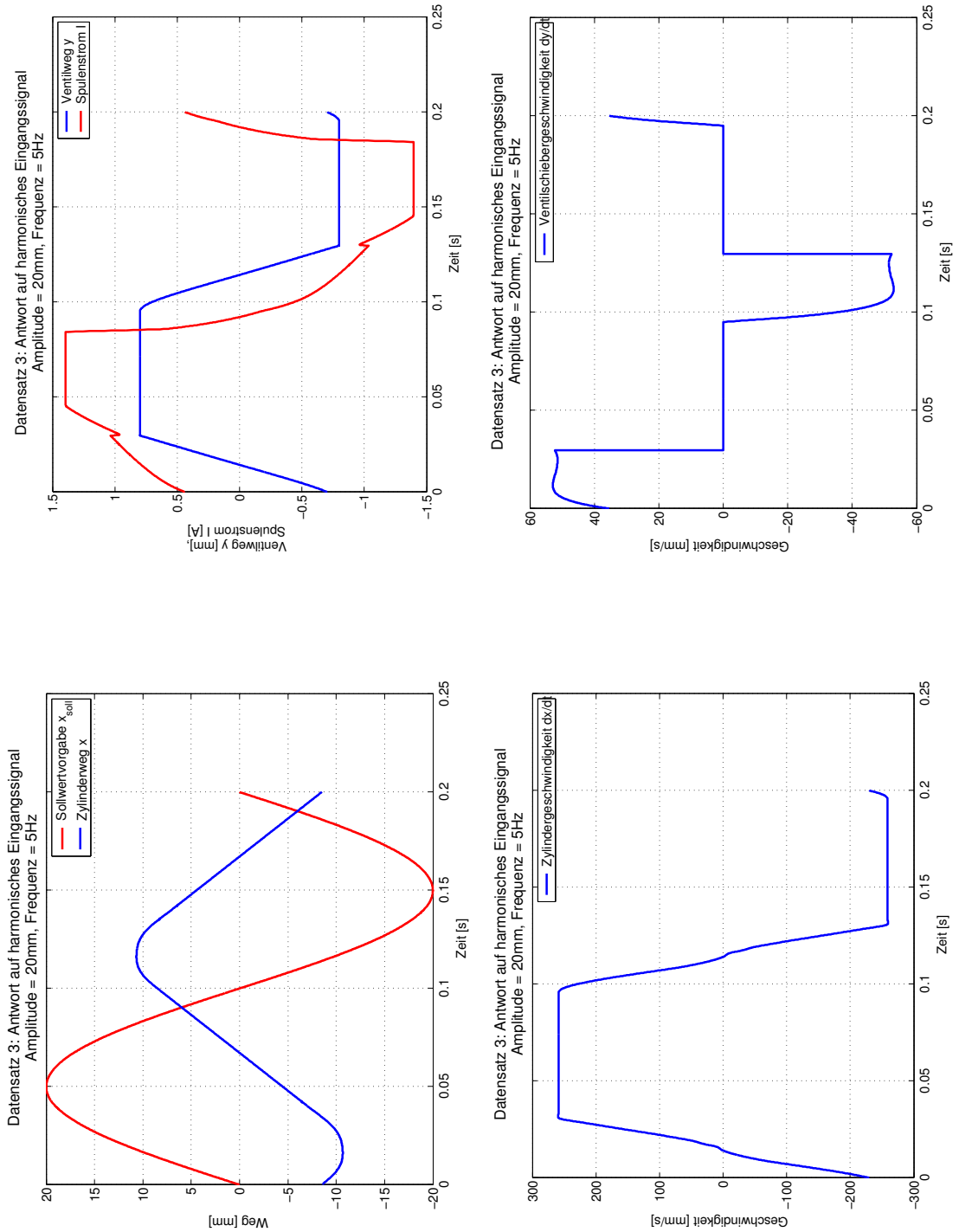
Datensatz 2



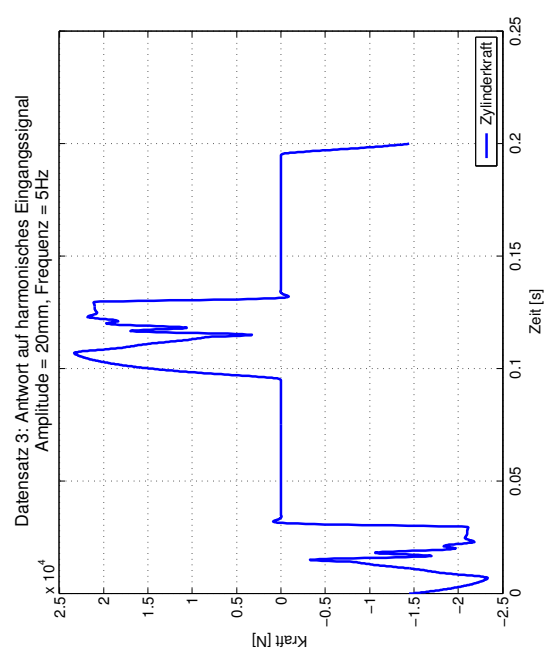
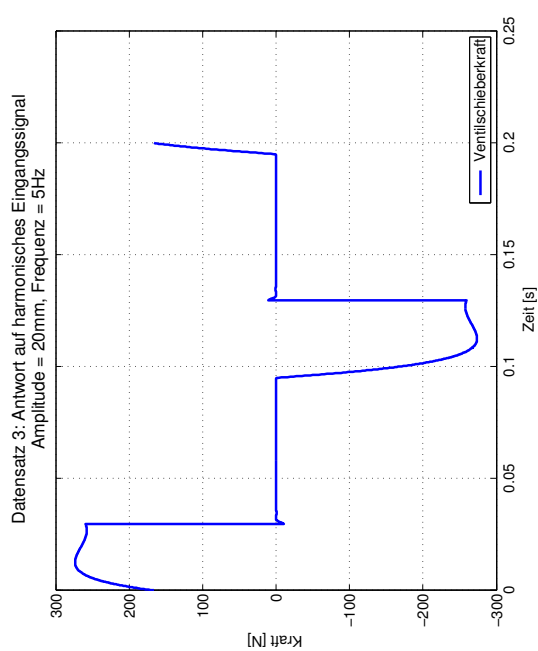
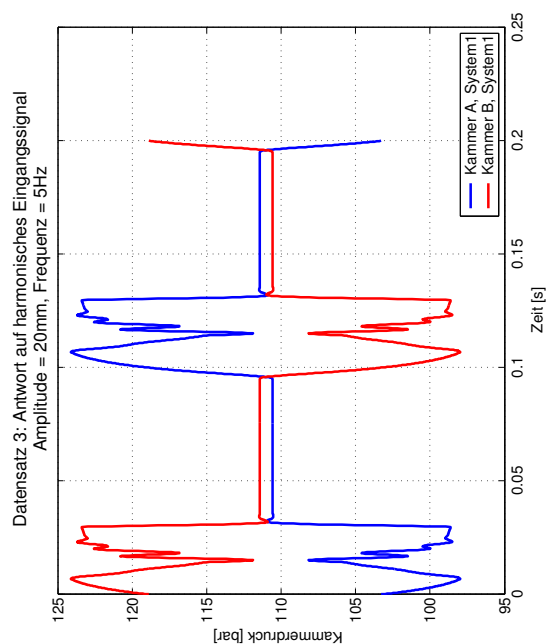
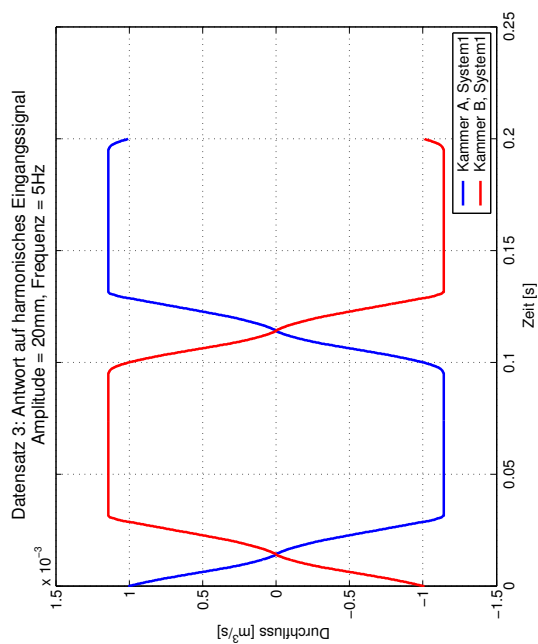
Datensatz 2



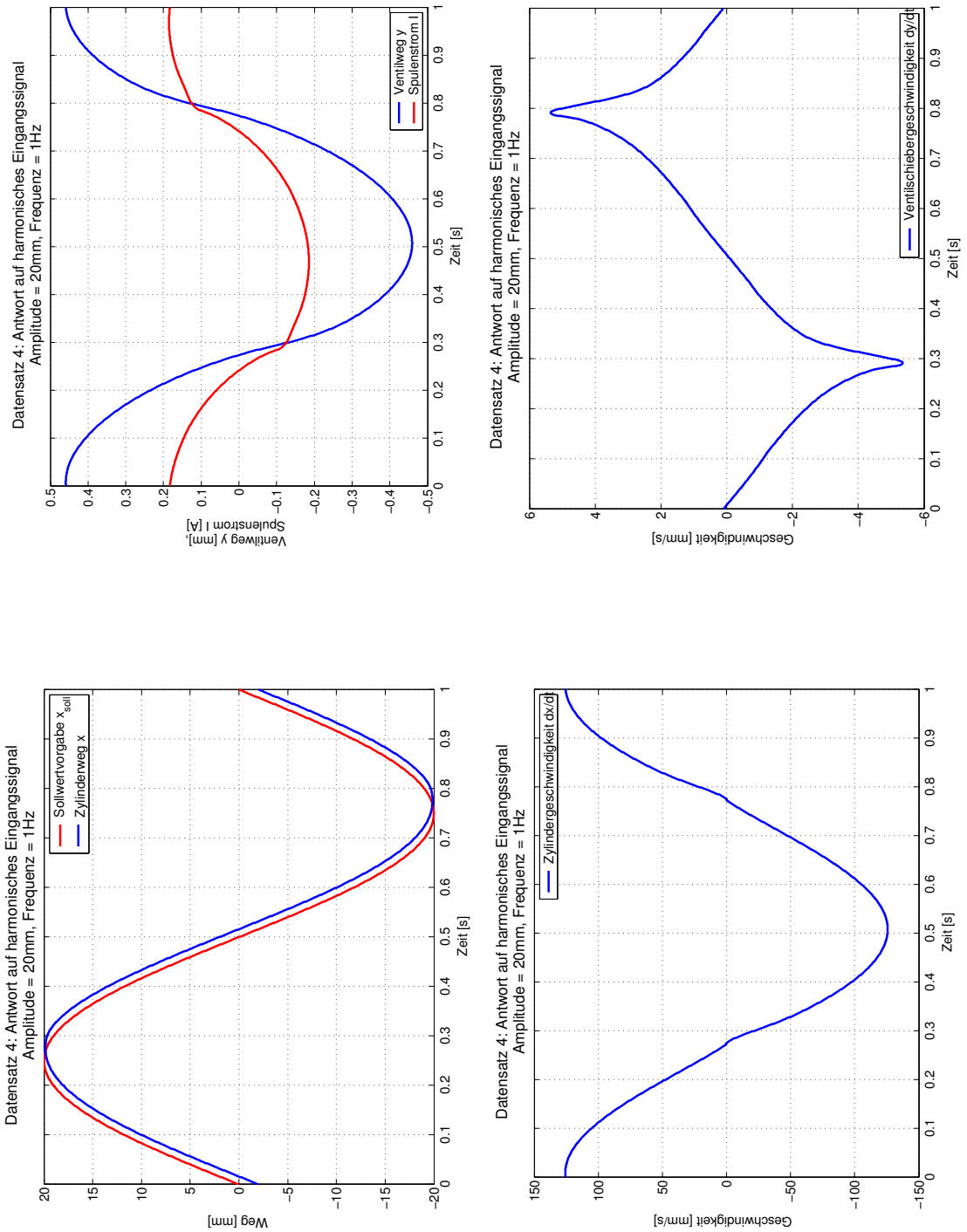
Datensatz 3



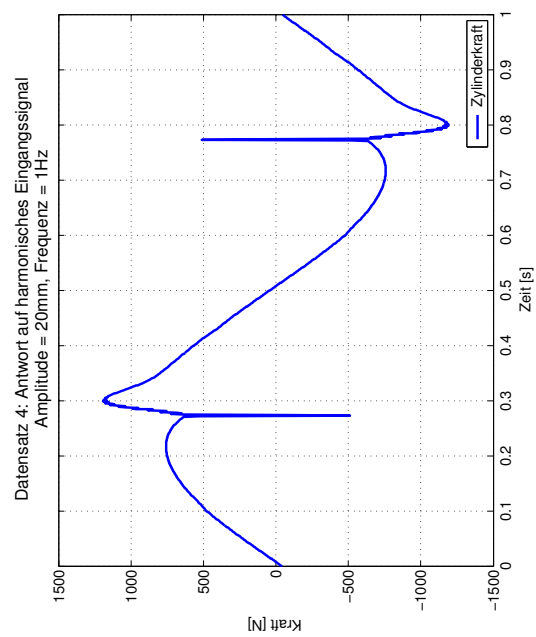
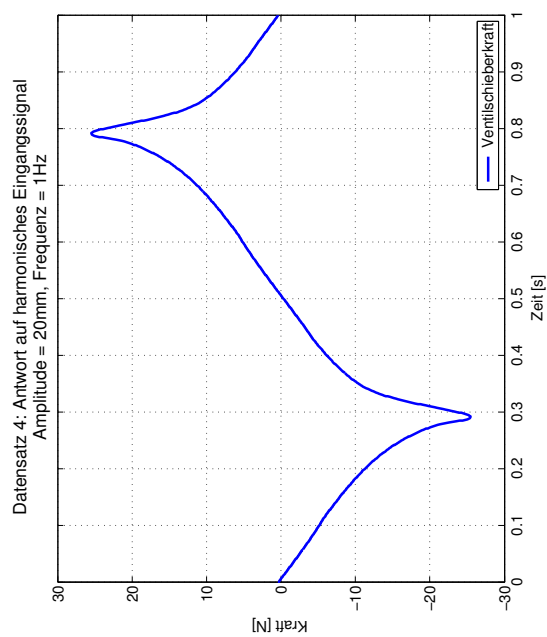
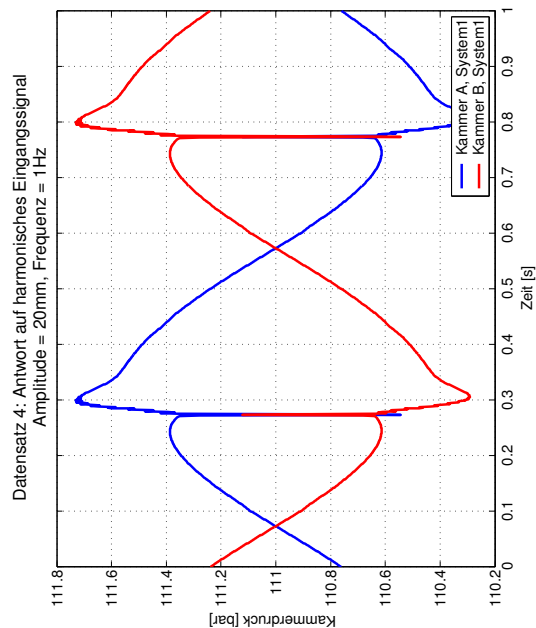
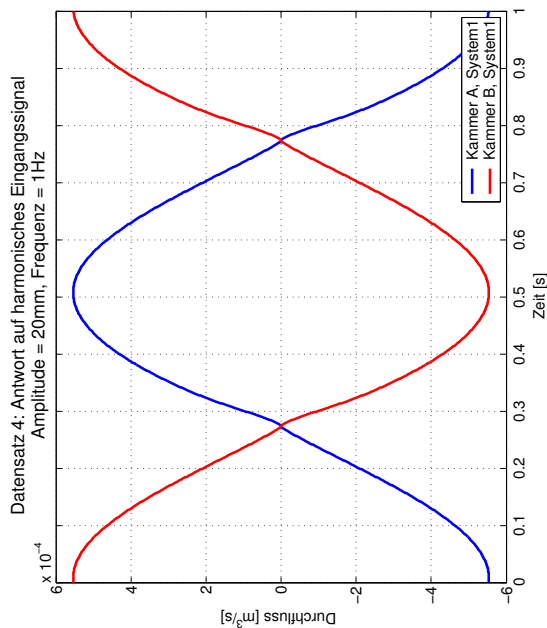
Datensatz 3



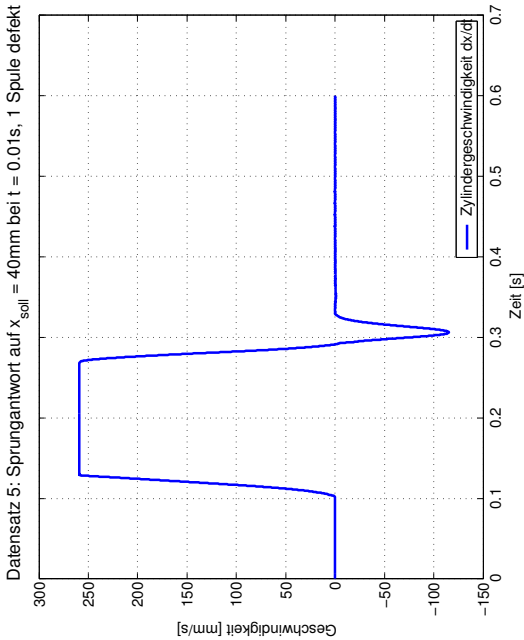
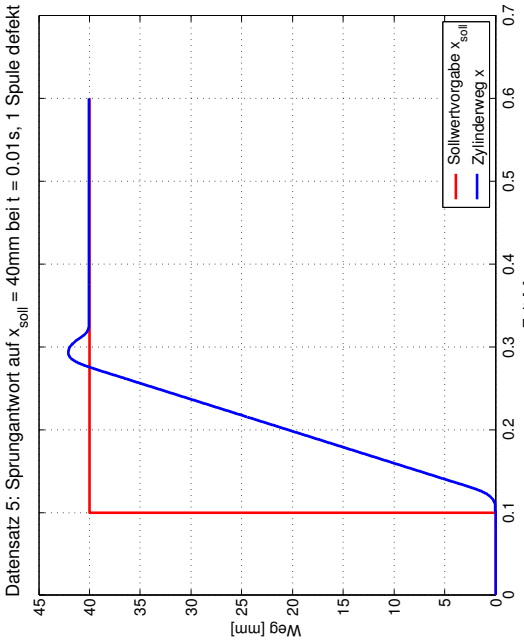
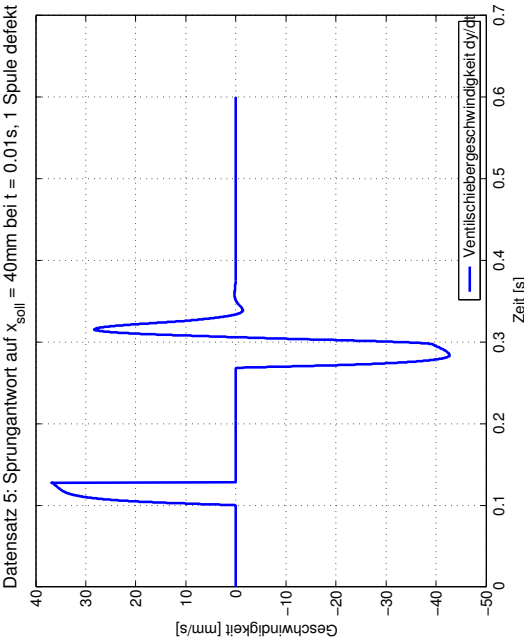
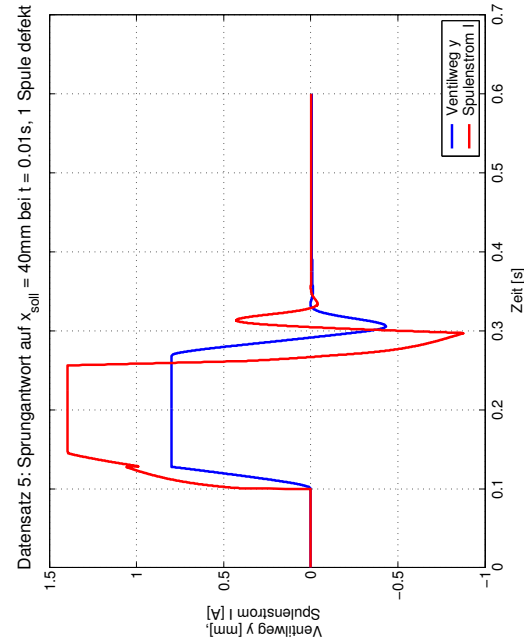
Datensatz 4



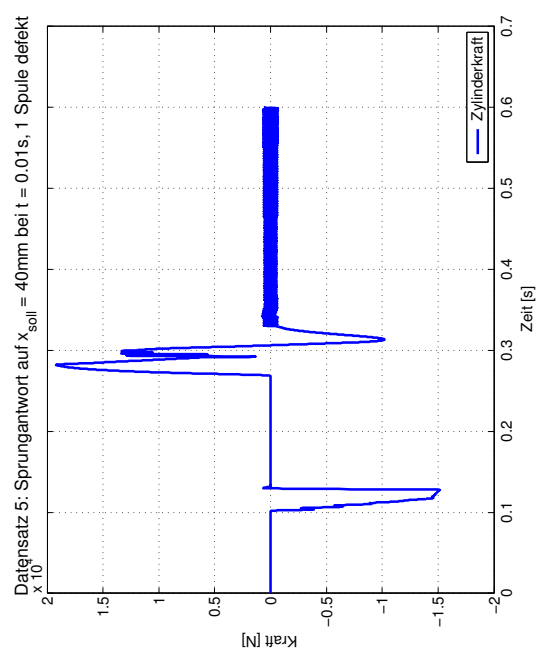
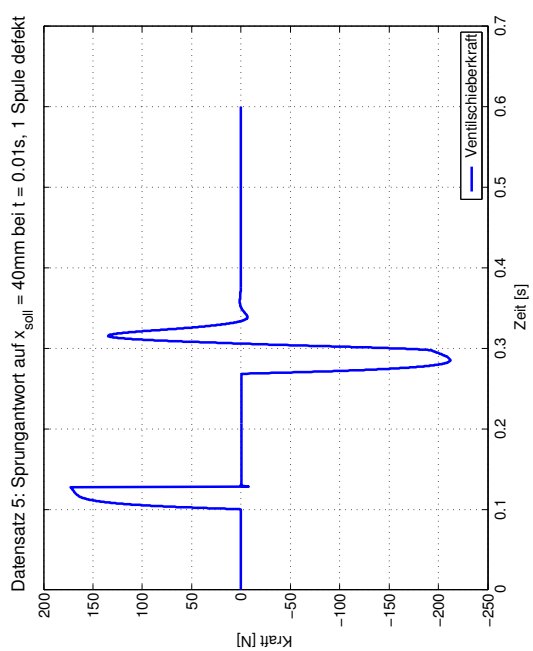
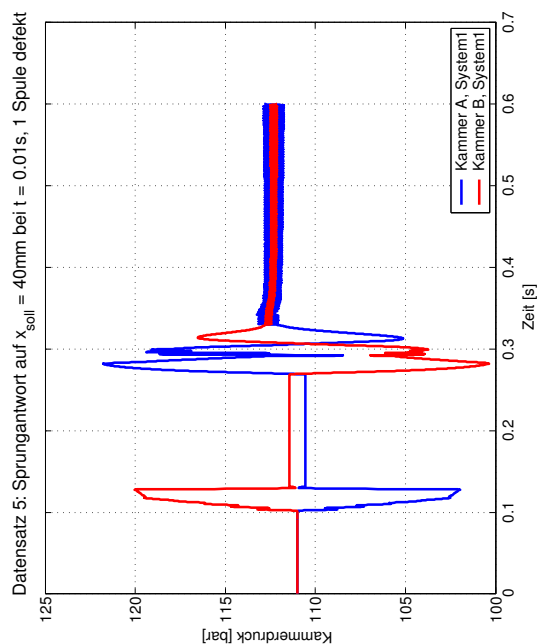
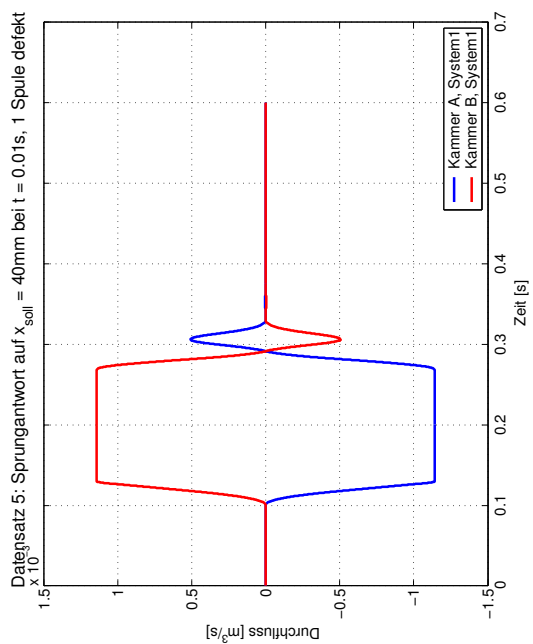
Datensatz 4



Datensatz 5

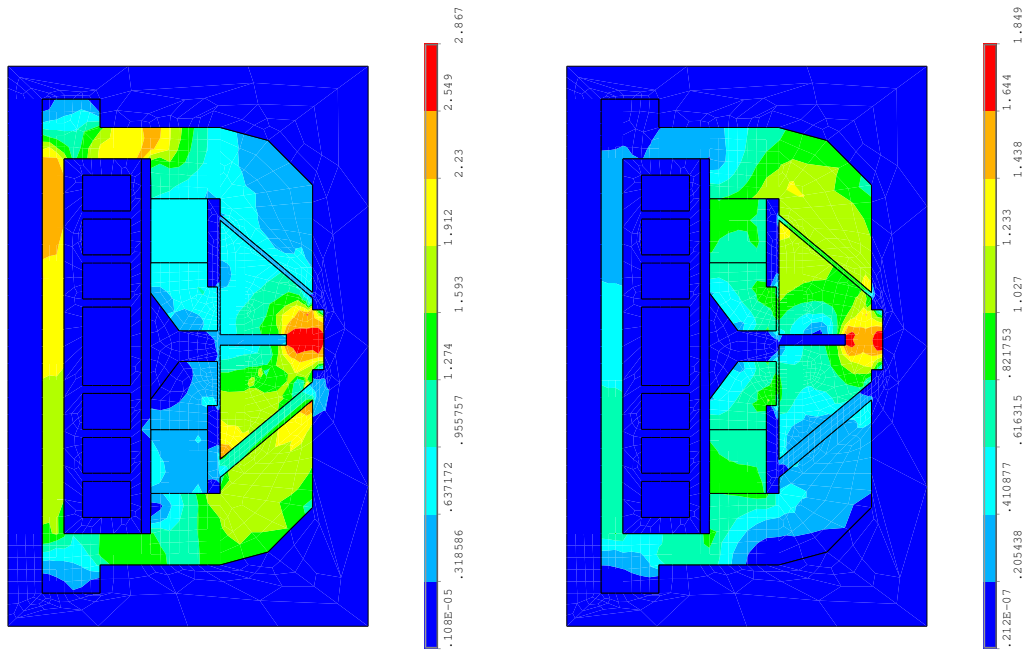


Datensatz 5



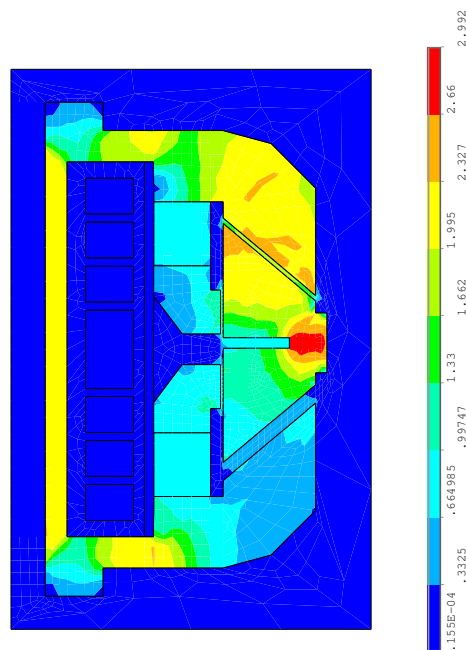
magnetische Flussdichte

$$B = f(y = +0.8\text{mm}, I)$$



Flussdichte B, $y = +0.8\text{mm}$ und
 $I = +1.4\text{A}$

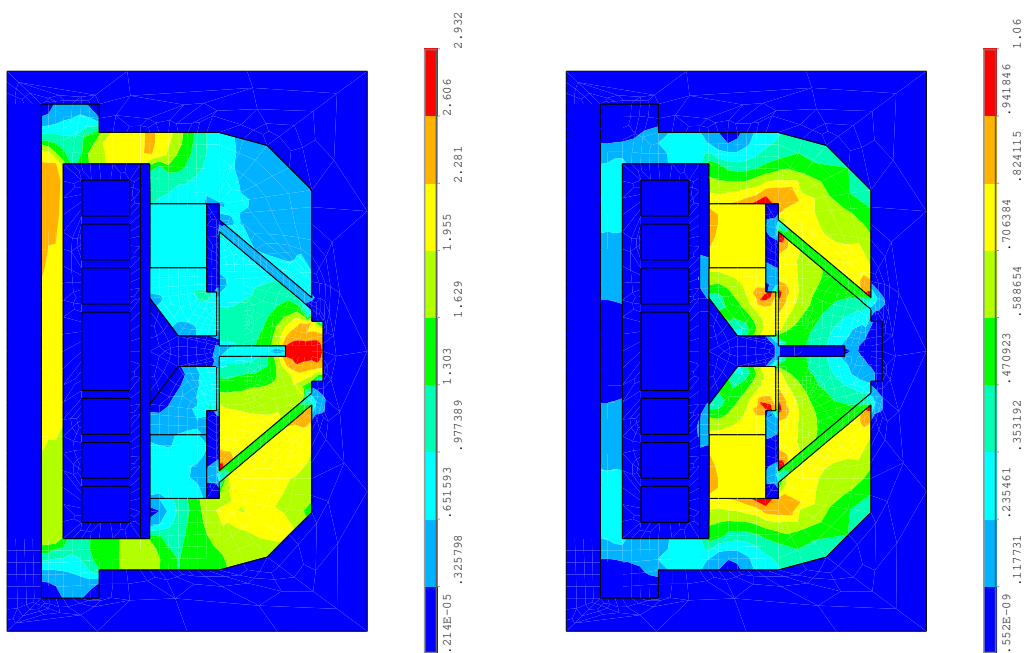
Flussdichte B, $y = +0.8\text{mm}$ und
 $I = 0.0\text{A}$



Flussdichte B, $y = +0.8\text{mm}$ und $I = -1.4\text{A}$

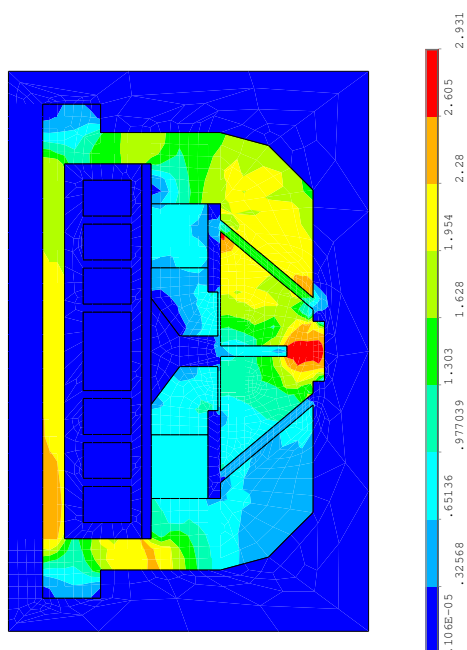
magnetische Flussdichte

$$B = f(y = 0.0\text{mm}, I)$$



Flussdichte B , $y = 0.0\text{mm}$ und
 $I = +1.4\text{A}$

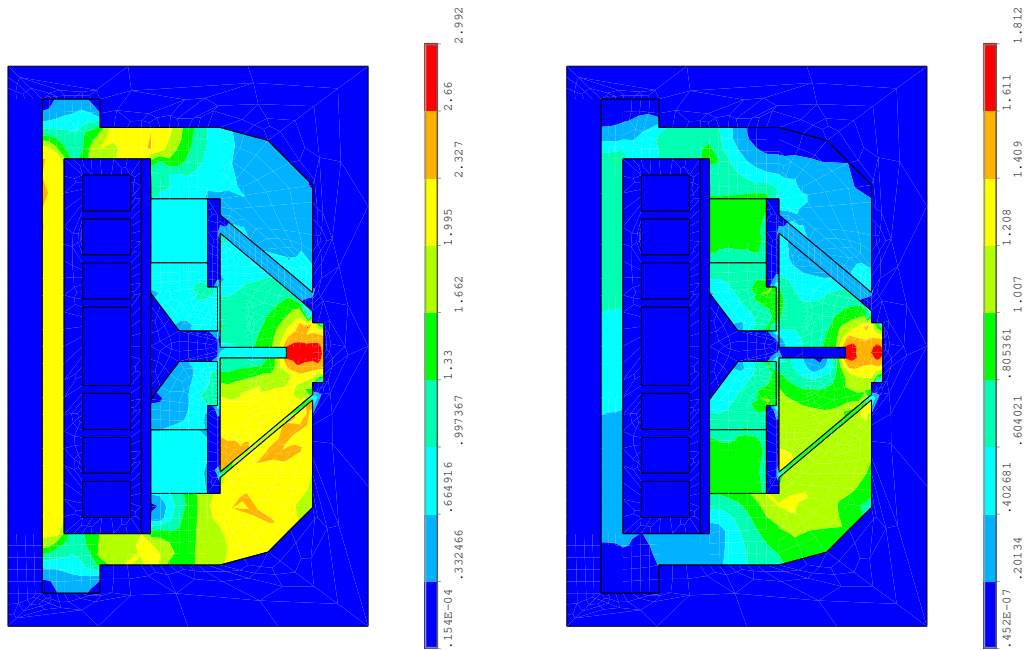
Flussdichte B , $y = 0.0\text{mm}$ und $I = 0.0\text{A}$



Flussdichte B , $y = 0.0\text{mm}$ und $I = -1.4\text{A}$

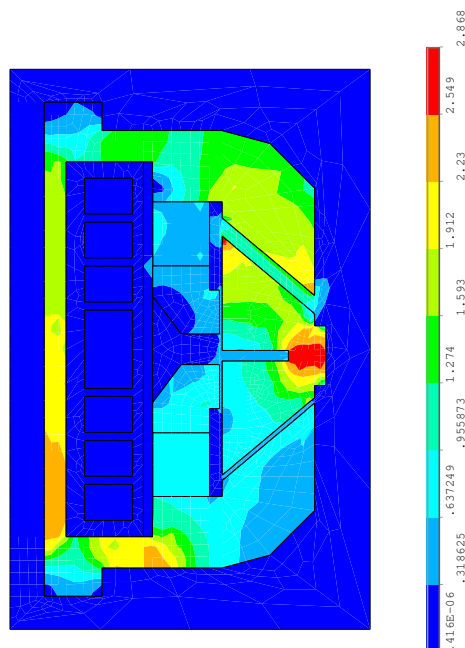
magnetische Flussdichte

$$B = f(y = -0.8\text{mm}, I)$$



Flussdichte B, $y = -0.8\text{mm}$ und
 $I = +1.4\text{A}$

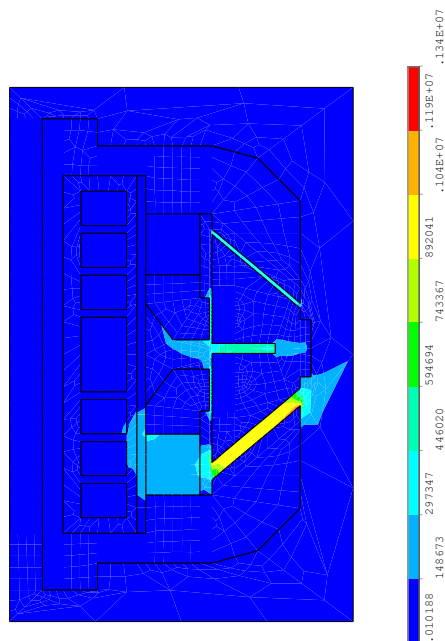
Flussdichte B, $y = -0.8\text{mm}$ und
 $I = 0.0\text{A}$



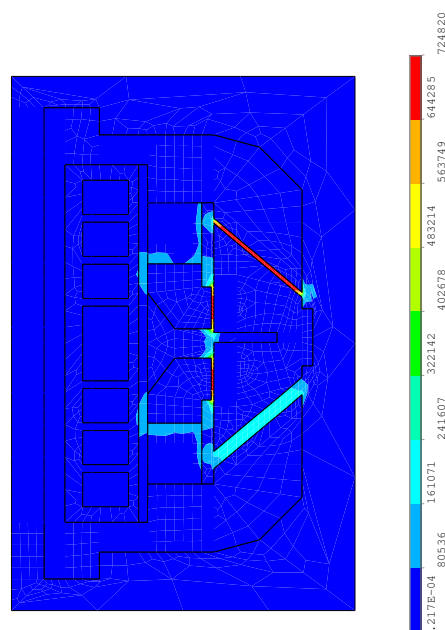
Flussdichte B, $y = -0.8\text{mm}$ und $I = -1.4\text{A}$

magnetische Feldstärke

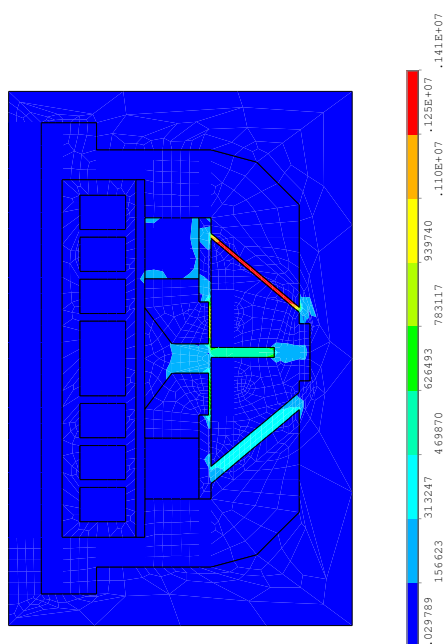
$$H = f(y = +0.8mm, I)$$



Feldstärke H , $y = +0.8mm$ und
 $I = +1.4A$



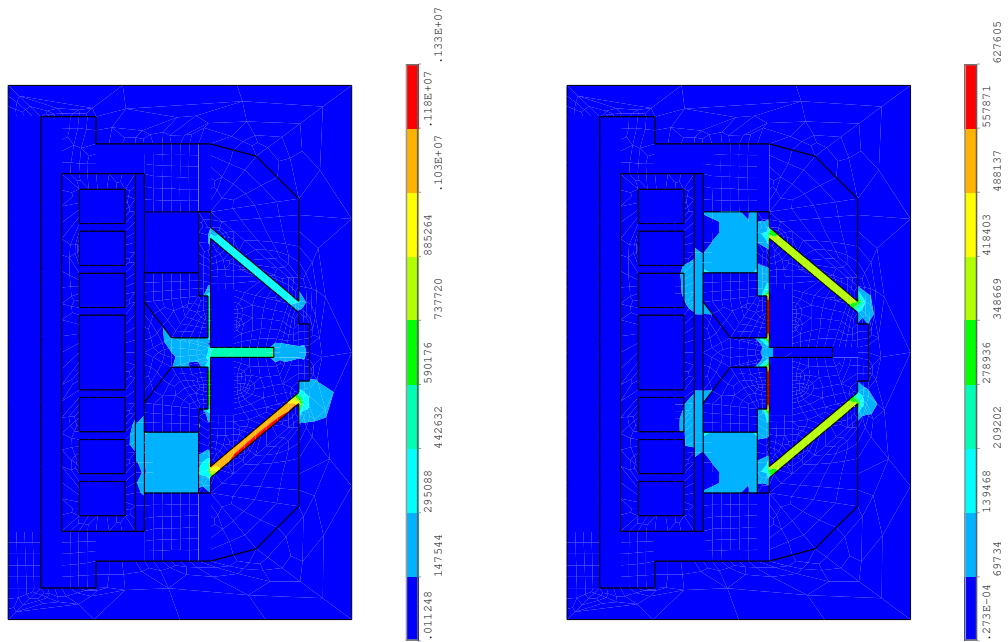
Feldstärke H , $y = +0.8mm$ und
 $I = 0.0A$



Feldstärke H , $y = +0.8mm$ und $I = -1.4A$

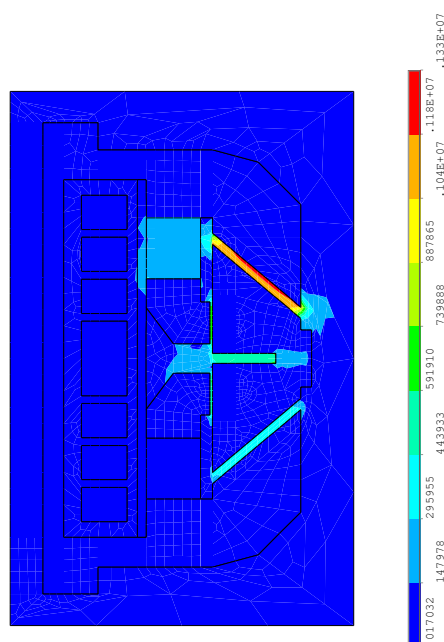
magnetische Feldstärke

$$H = f(y = 0.0\text{mm}, I)$$



Feldstärke H , $y = 0.0\text{mm}$ und
 $I = +1.4\text{A}$

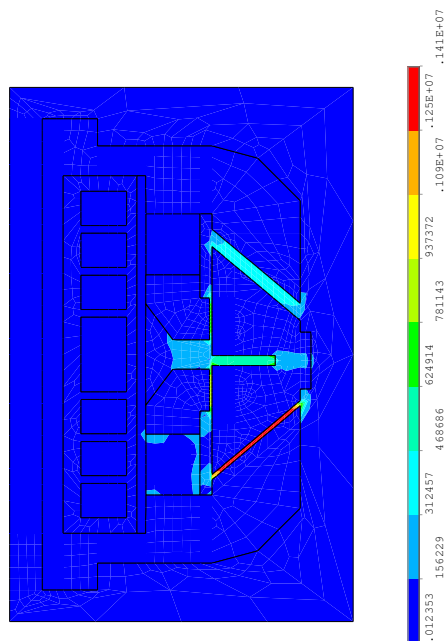
Feldstärke H , $y = 0.0\text{mm}$ und $I = 0.0\text{A}$



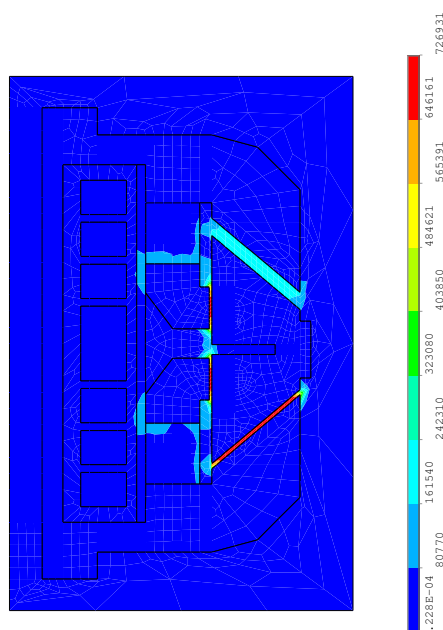
Feldstärke H , $y = 0.0\text{mm}$ und $I = -1.4\text{A}$

magnetische Feldstärke

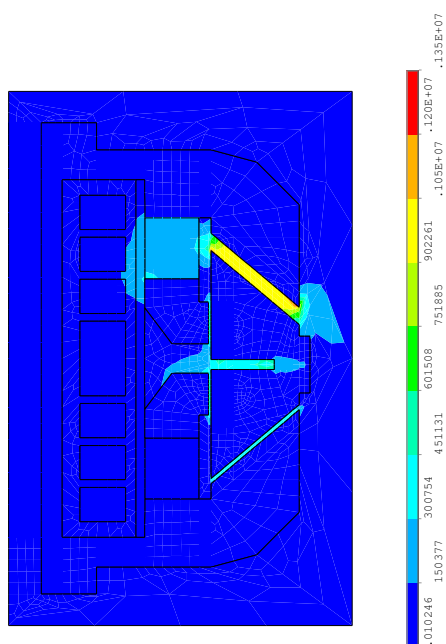
$$H = f(y = -0.8\text{mm}, I)$$



Feldstärke H , $y = -0.8\text{mm}$ und
 $I = +1.4\text{A}$



Feldstärke H , $y = -0.8\text{mm}$ und
 $I = 0.0\text{A}$



Feldstärke H , $y = -0.8\text{mm}$ und $I = -1.4\text{A}$

Fragebogen I

VP-Nr.: _____ Datum: _____ Uhrzeit: _____

Persönliches Befinden, Erfahrung mit VR, thematisches Vorwissen

Fragen zur Versuchsperson

Geburtsjahr: _____ Geschlecht: m ☐

w ☐

Fachrichtung: _____ Akademischer Grad: Dipl.-Ing ☐

cand.-Ing ☐

Psychisches und physisches Befinden

1. Fühlen Sie sich aufnahmefähig? nein ☐ ☐ ☐ ☐ sehr ☐
2. Fühlen Sie sich müde? nein ☐ ☐ ☐ ☐ sehr ☐
3. Haben Sie heute schon Mittel genommen, die Ihre Wahrnehmung oder Reaktionsfähigkeit beeinflussen? ja ☐ nein ☐
4. Sind Sie darauf gespannt, was Sie jetzt erwartet? nein ☐ ☐ ☐ ☐ sehr ☐

Vorkenntnisse

5. Haben Sie Erfahrung mit VR-Systemen? viel ☐ ☐ ☐ ☐ wenig ☐
6. Haben Sie schon einmal ein HMD getragen? ja ☐ nein ☐
7. Haben Sie schon einmal einen Datenhandschuh getragen? ja ☐ nein ☐
8. Besitzen Sie Vorkenntnisse über den Beispielaktuator? viel ☐ ☐ ☐ ☐ wenig ☐

Fragebogen II

VP-Nr.: _____

Datum: _____

Uhrzeit: _____

Hardware Interface, Immersion, Interaktion, Instruktion, subjektive Einschätzungen

Hardware Interface

1. Hat Sie das HMD behindert? **stark** **nicht**
☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
2. Beurteilen Sie die Auflösung des HMD für die Objekterkennung? **ausreichend** **nicht ausreichend**
☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
3. Wie flüssig waren die Bewegungen von Hand und Kopf? **flüssig** **nicht flüssig**
☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
4. Empfanden Sie die Verkabelung als störend? **störend** **nicht störend**
☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Immersion

5. Wie empfanden Sie die Darstellung? **realitätsfern** **realitätsnah**
☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
6. Inwieweit hatten Sie das Gefühl sich im Raum zu befinden? **gar nicht** **sehr stark**
☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Interaktion

7. Das Betätigen der Druckschalter war **einfach** **nicht einfach**
☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐
8. Wie intuitiv finden Sie das Bedienkonzept des Schaltpultes? **sehr** **wenig**
☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐

Instruktion

9. Hat die gegebene Einführung ausgereicht, um die gestellte Aufgabe zu erfüllen?
- nein** ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ **ja**

10. Waren Sie während Ihrer Aufgabe abgelenkt?
- gar nicht** ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ **sehr stark**

Wenn ja, durch was?

11. War der gewünschte Informationszugriff für Sie jederzeit gegeben?
- immer** ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ **nie**

Subjektive Einschätzungen

12. Die Anzahl der Fragen, die zu beantworten waren, war
- zu groß** ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ **zu klein**

13. Die Zeit zur Bearbeitung der Fragen war
- zu kurz** ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ **ausreichend**

14. Schätzen Sie, wie viel Prozent der gestellten Fragen Sie richtig beantwortet haben.
- _____ %

15. Bewerten Sie die Informationsausgabe mit Hilfe von VR-Technologie.
- positiv** ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ **negativ**

16. Ich musste mich stark konzentrieren.
- ja** ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ **nein**

17. Diese Art der Informationsaufnahme fällt mir im Vergleich zur konventionellen Methode
- schwerer** ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ **leichter**

18. Weitere Anmerkungen:

Testformular I

VP-Nr. __

Testanweisung

Das Testformular I setzt sich aus Multiple-Choice Aufgaben zusammen, d.h. nach jeder Frage sind mehrere mögliche Antworten vorgegeben und es können eine oder mehrere Antworten richtig sein.

Bitte kreuzen Sie eine Antwort nur dann an, wenn Sie sich sicher sind, dass diese auch richtig ist. Um den Einfluss von Treffern durch Raten zu minimieren, wird bei der Auswertung eine **Ratekorrektur** vorgenommen.

Als Ratekorrektur kommt folgende Formel zum Einsatz:

$$\begin{aligned} EP &= \sum RA + \sum KA + \sum FA, \text{ mit} \\ EP &\equiv \text{erreichte Punktzahl} \\ RA &\equiv \text{richtige Antwort (2 Punkte)} \\ KA &\equiv \text{keine Antwort (1 Punkt)} \\ FA &\equiv \text{falsche Antwort (0 Punkte)} \end{aligned} \tag{A.11}$$

Zur Beantwortung der Fragen stehen Ihnen 5 Minuten zur Verfügung. Alle zur Beantwortung notwendigen Daten und Informationen wurden Ihnen im Versuch zur Verfügung gestellt.

Testformular I

VP-Nr. __

Frage 1: Wieviele Kammern besitzt der Hydraulikzylinder des Seitenruderaktuator?

1	2	3	4
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Frage 2: Wie groß ist dem Betrag nach der maximal erreichbare Spulenstrom $|I|$?

0.6 A	1.0 A	1.4 A	1.8 A
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Frage 3: Wovon hängt die Druckdifferenz ΔP zwischen den Kammern des Zylinders im reibungsfreien Fall ab?

von der maximalen Geschwindigkeit des Ventilschiebers	<input type="checkbox"/>
von der Geschwindigkeit des Zylinders	<input type="checkbox"/>
von der Last am Zylinder	<input type="checkbox"/>
von der Bestromung der Motorspulen	<input type="checkbox"/>

Frage 4: Wodurch wird die Kraft des Linearmotors im reibungsfreien Fall limitiert?

durch den maximalen Ventilschieberweg y	<input type="checkbox"/>
durch die Strömungskräfte auf den Ventilschieber	<input type="checkbox"/>
durch das nichtlineare Werkstoffverhalten des Eisenkreises im Linearmotor	<input type="checkbox"/>

Testformular I

Frage 5: Die Antwort des Aktuators auf eine harmonische Anregung

$f_{(t)} = A \cdot \sin(\omega \cdot t)$ degeneriert unter bestimmten Bedingungen qualitativ gesehen zu einem Signal mit dreiecksförmigen Verlauf.

(a) Unter welchen Bedingungen ist dies der Fall?

bei steigendem Motor-Spulenstrom I	<input type="checkbox"/>
bei steigender Last (konstante Kraft F_{Last} am Zylinder)	<input type="checkbox"/>
bei steigender Frequenz der Anregung ω	<input type="checkbox"/>
bei fallender Amplitude der Anregung A	<input type="checkbox"/>

(b) Was ist der ausschlaggebende Grund dafür?

der limitierte Motor-Spulenstrom I	<input type="checkbox"/>
der limitierte Durchfluss vom Ventil zum Zylinder	<input type="checkbox"/>
die Masse des Kolbens	<input type="checkbox"/>

Frage 6: Die Sprungantworten des Gesamtsystems unterscheiden sich für eine Simulation des Gesamtsystems (idealisiert reibungsfrei) mit einer Lastsimulation:

(a) durch eine angekoppelte passive Masse von 1000kg .

(b) durch eine konstante Kraft von 1000N .

Ordnen Sie die unten stehenden Eigenschaften (a) oder (b) zu!

	(a)	(b)
größere Druckdifferenz ΔP am Kolben (im stationären Zustand, $v_x \neq 0$, $v_x = \text{const.}$)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
größere Druckdifferenz ΔP am Kolben (im instationären Zustand, $v_x \neq \text{const.}$)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Testformular II

VP-Nr. __

Testanweisung

Das Testformular II setzt sich aus Multiple-Choice Aufgaben zusammen, d.h. nach jeder Frage sind mehrere mögliche Antworten vorgegeben und es können eine oder mehrere Antworten richtig sein. Darüber hinaus enthält der Test eine Aufgabe mit freier Antwort, markieren Sie den erfragten Bereich eindeutig, z.B. mit Hilfe eines Kreises.

Bitte kreuzen Sie eine Antwort nur dann an, wenn Sie sich sicher sind, dass diese auch richtig ist. Um den Einfluss von Treffern durch Raten zu minimieren, wird bei der Auswertung eine **Ratekorrektur** vorgenommen.

Als Ratekorrektur kommt folgende Formel zum Einsatz:

$$EP = \sum RA + \sum KA + \sum FA, \text{ mit}$$

$$EP \equiv \text{erreichte Punktzahl} \quad (\text{A.12})$$

$$RA \equiv \text{richtige Antwort (2 Punkte)}$$

$$KA \equiv \text{keine Antwort (1 Punkt)}$$

$$FA \equiv \text{falsche Antwort (0 Punkte)}$$

Zur Beantwortung der Fragen stehen Ihnen 5 Minuten zur Verfügung. Alle zur Beantwortung notwendigen Daten und Informationen wurden Ihnen im Versuch zur Verfügung gestellt.

Testformular II

VP-Nr. __

Frage 1: Wie viele Spulen besitzt der Linearmotor des Seitenruderaktuators?

1	2	3	4
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Frage 2: Wie groß ist dem Betrag nach der maximale Ventilschieberweg $|y|$?

0.8 mm	1.0 mm	1.2 mm	1.4 mm
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Frage 3: Wodurch wird die maximale Geschwindigkeit des Kolbens im lastfreien Fall limitiert?

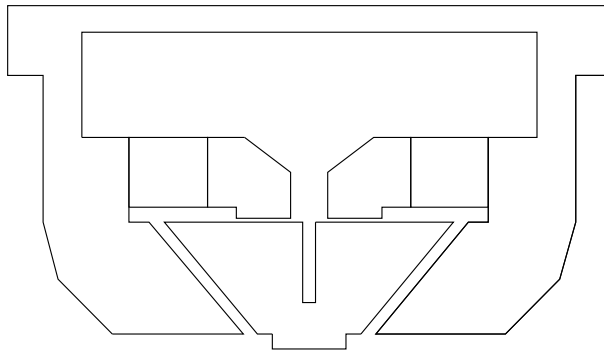
durch die Masse des Kolbens	<input type="checkbox"/>
durch den Ventilschieberweg y	<input type="checkbox"/>
durch den maximalen Fluss Q vom Ventil zum Zylinder	<input type="checkbox"/>
durch die Reibung des Kolbens im Zylinder	<input type="checkbox"/>

Frage 4: Wann wird der maximale Fluss von Hydrauliköl zu den Zylinderkammern erreicht?

bei maximalem Ventilschieberweg	<input type="checkbox"/>
bei maximaler Ventilschiebergeschwindigkeit	<input type="checkbox"/>
bei minimaler Last am Zylinder	<input type="checkbox"/>
bei Sättigung des Eisenkreises im Linearmotor	<input type="checkbox"/>

Testformular II

Frage 5: Markieren Sie in der unten stehenden schematisierenden Darstellung des Linearmotors den Bereich, in dem der Eisenkreis zuerst in den gesättigten Bereich geht (z.B. durch Einkreisen)!



Frage 6: Welche Konsequenzen ergeben sich für das Gesamtsystem, wenn eine der Spulen im Linearmotor durch einen Wicklungsbruch nicht bestromt werden kann (verglichen mit dem intakten System)?

Der Linearmotor baut eine geringere elektromagnetische Kraft auf.	<input type="checkbox"/>
Im stationären Fall ist der Durchfluss durch das Ventil verringert.	<input type="checkbox"/>
Die maximale Beschleunigung des Kolbens verringert sich.	<input type="checkbox"/>
Die maximale Geschwindigkeit des Ventilschiebers verringert sich.	<input type="checkbox"/>
Die maximale Geschwindigkeit des Kolbens verringert sich.	<input type="checkbox"/>

A.3 Auswertung der subjektiven Versuchsergebnisse

A.3.1 Auswertung der Fragebögen

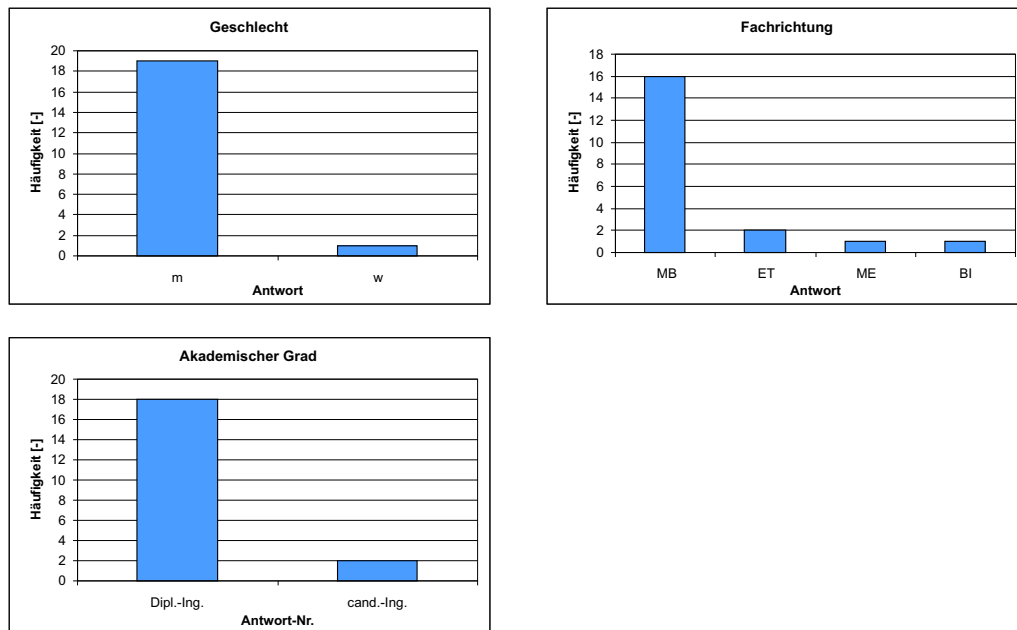


Abbildung A.1: Fragebogen I: Fragen zur Versuchsperson

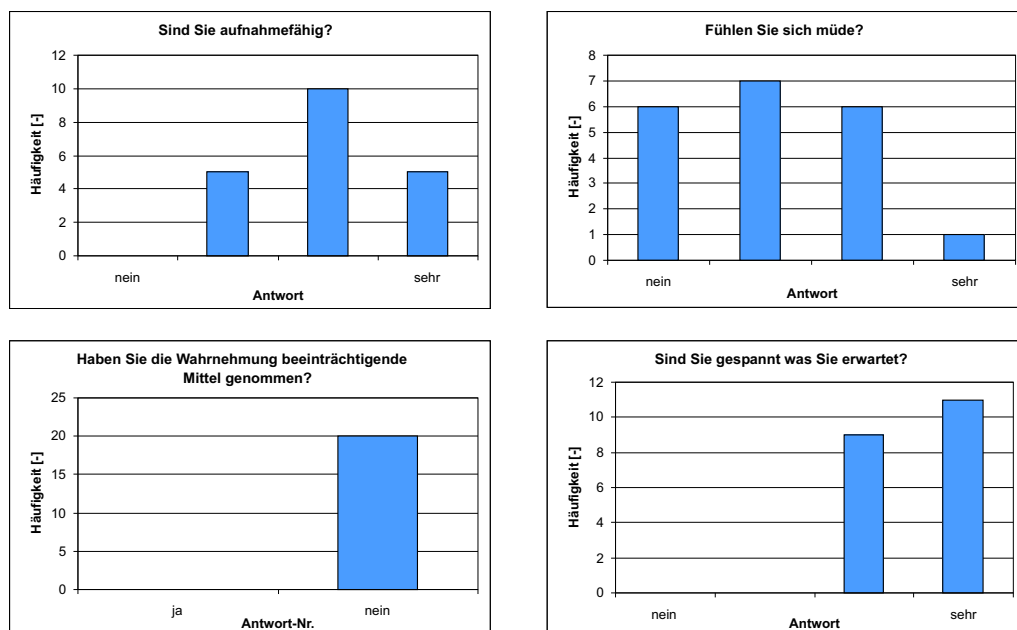


Abbildung A.2: Fragebogen I: Psychisches und physisches Befinden

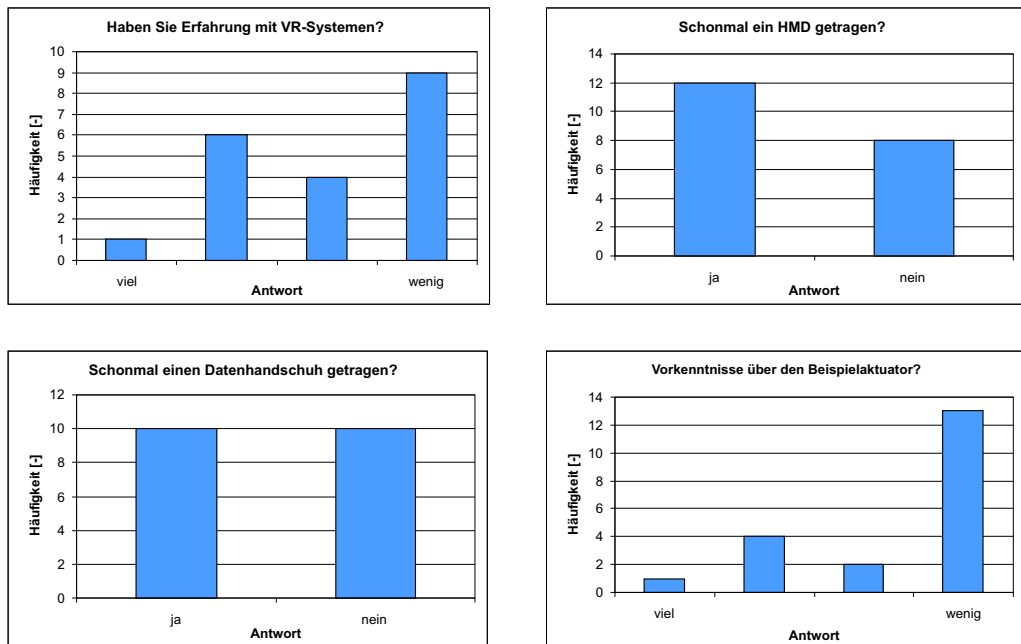


Abbildung A.3: Fragebogen I: Vorkenntnisse

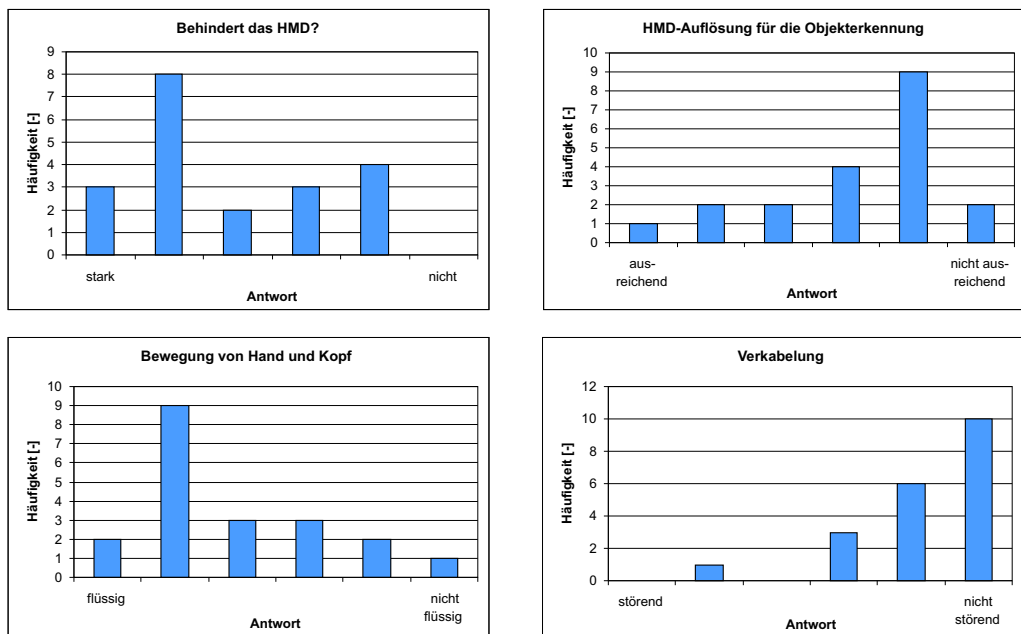


Abbildung A.4: Fragebogen II: Hardware Interface

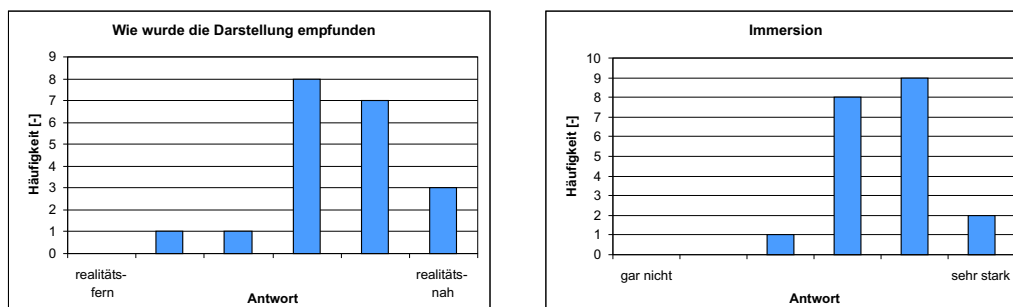


Abbildung A.5: Fragebogen II: Immersion

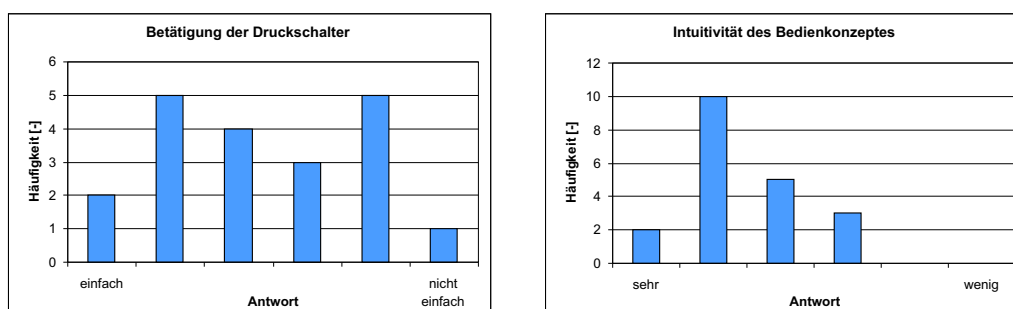


Abbildung A.6: Fragebogen II: Interaktion

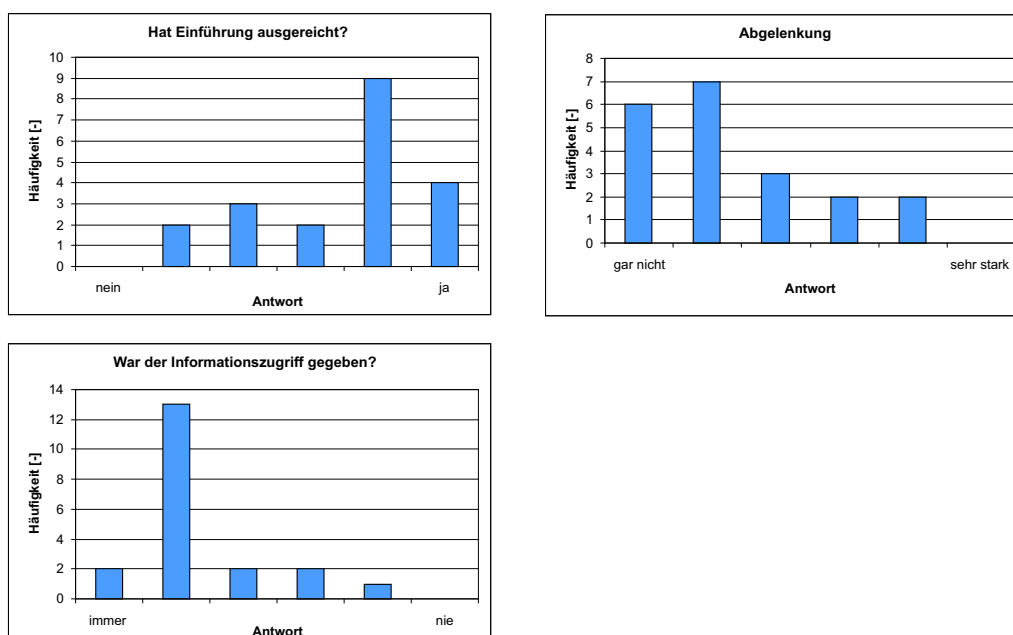


Abbildung A.7: Fragebogen II: Instruktion

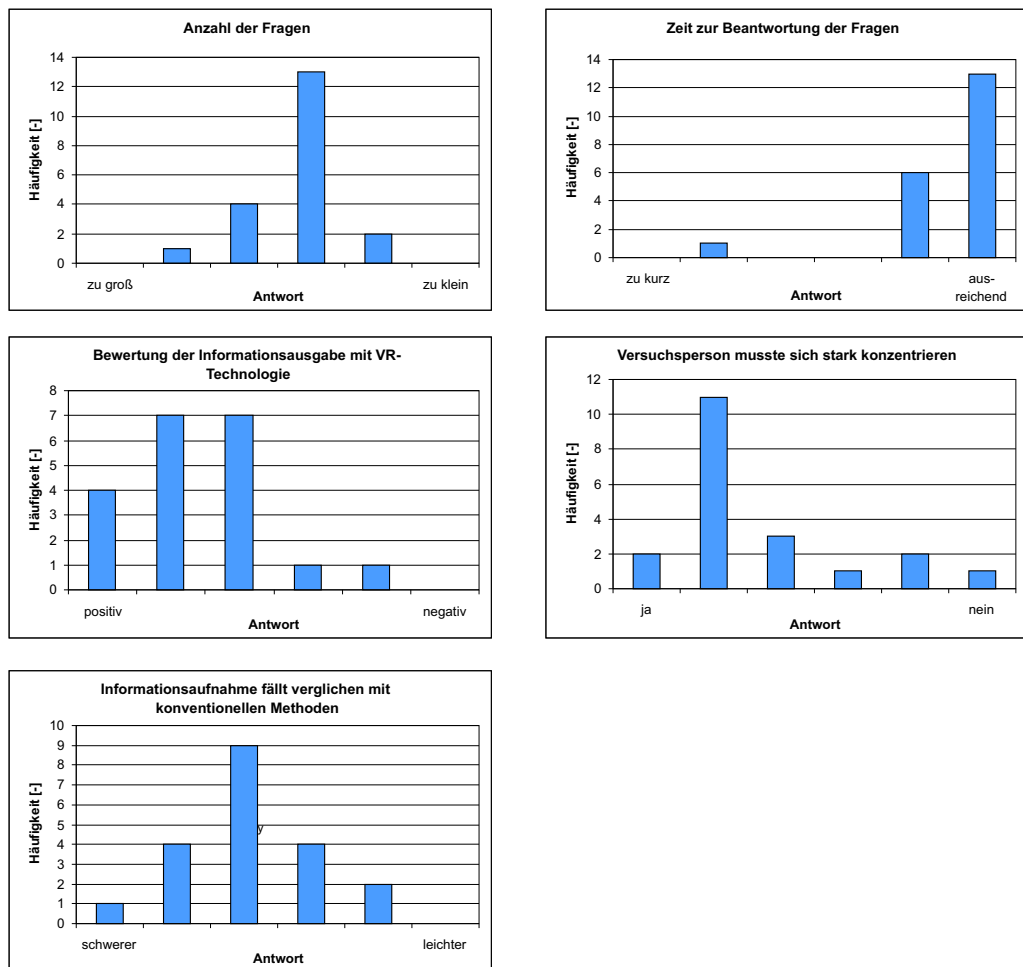
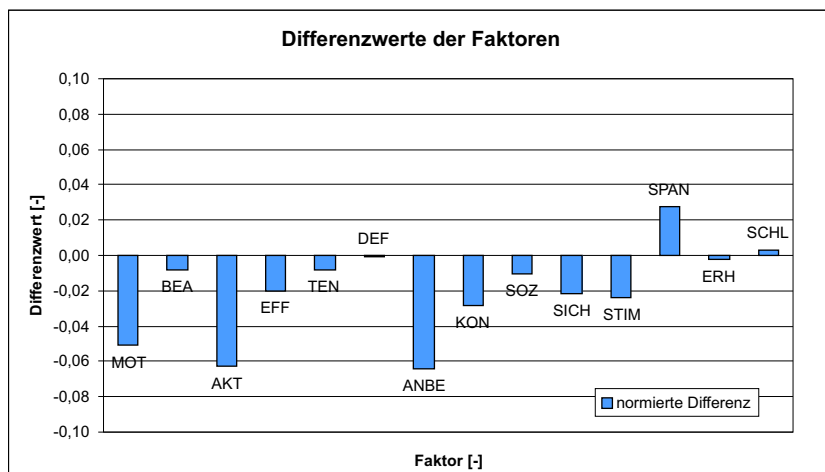
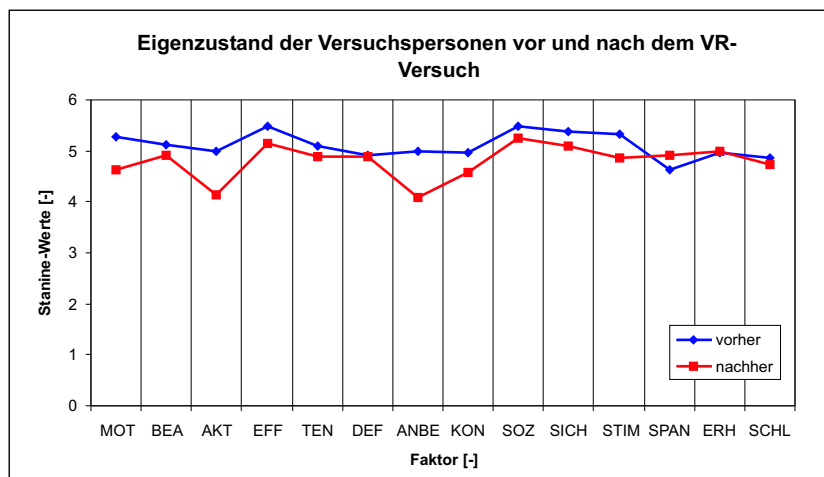


Abbildung A.8: Fragebogen II: Subjektive Einschätzungen

A.3.2 Auswertung des Eigenzustand-Tests (EZ-Test)



Abkürzung	Faktor	Abkürzung	Faktor	Abkürzung	Faktor
MOT	Motivation	BEA	Beanspruchung	AKT	Aktivierung
EFF	Effizienz	TEN	Tension	DEF	Defizienz
ANBE	Anstrengungsbereitschaft	KON	Kontaktbereitschaft	SOZ	Soziale Anerkennung
SICH	Selbstsicherheit	STIM	Stimmungslage	SPAN	Spannungslage
ERH	Erholtheit	SCHL	Schläfrigkeit		

Abbildung A.9: Eigenzustand Staninewerte und Differenzen

A.4 Statistische Auswertung der objektiven Versuchsergebnisse

A.4.1 Testergebnisse

Die Testergebnisse wurden mit Hilfe der in Kapitel 6.5.2 beschriebenen Ratekorrektur ausgewertet. Die Maximalpunktzahl der Tests beträgt 16 Punkte.

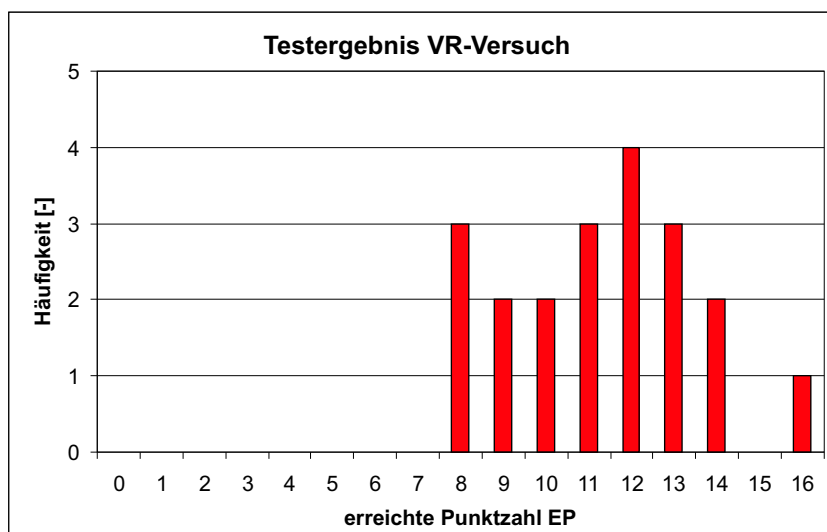


Abbildung A.10: Testergebnisse VR-Versuch (*Excel*)

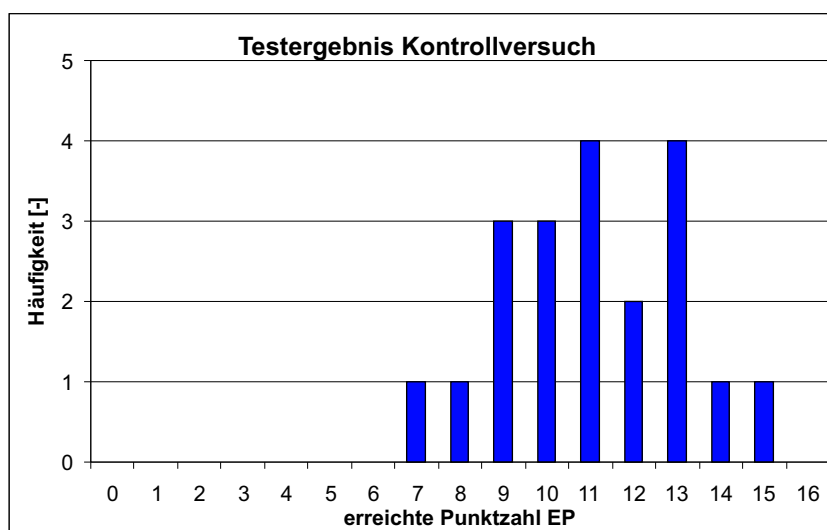
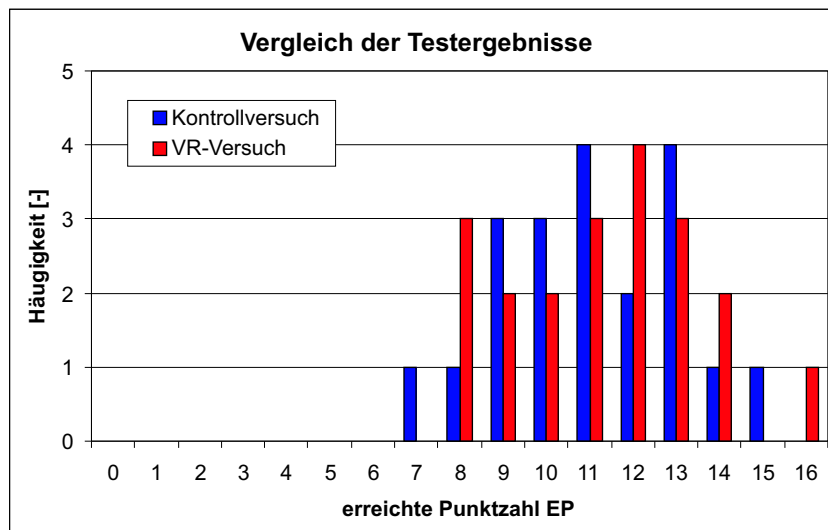
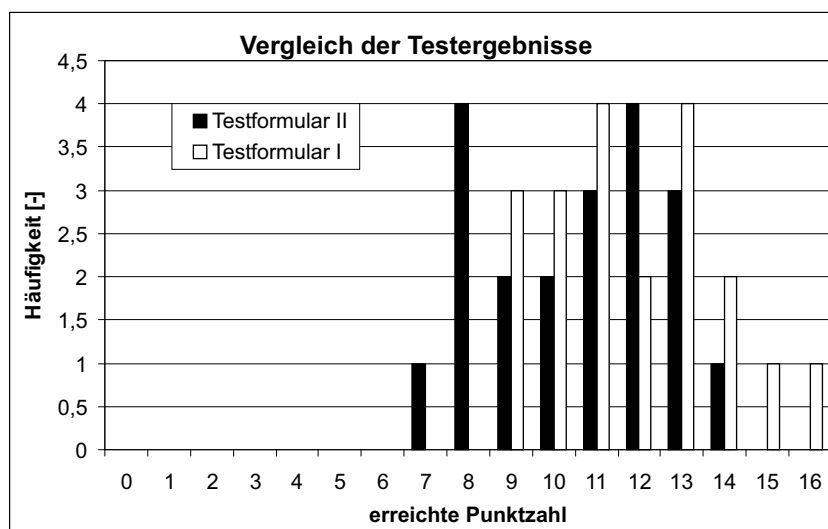


Abbildung A.11: Testergebnisse Kontrollversuch (*Excel*)

Abbildung A.12: Vergleich der Testergebnisse zwischen den beiden Versuchen (*Excel*)Abbildung A.13: Vergleich der Testergebnisse zwischen den beiden Testformularen (*Excel*)

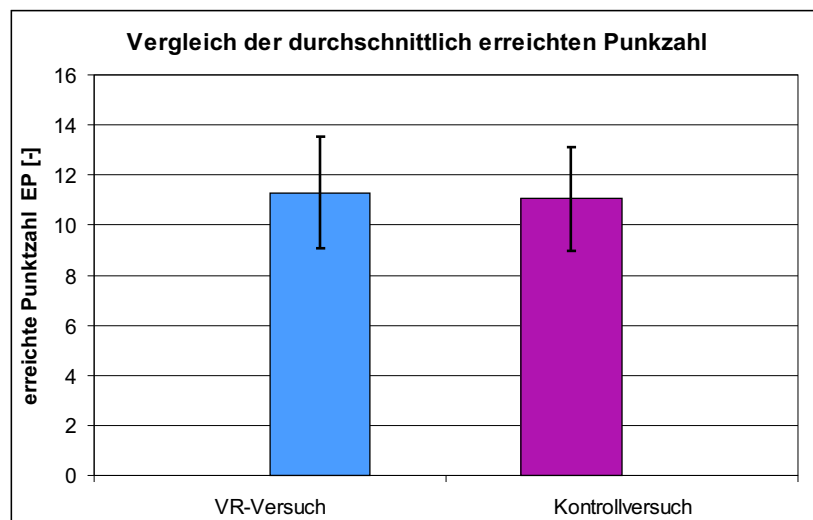


Abbildung A.14: In den Versuchen durchschnittlich erreichte Punktzahl EP

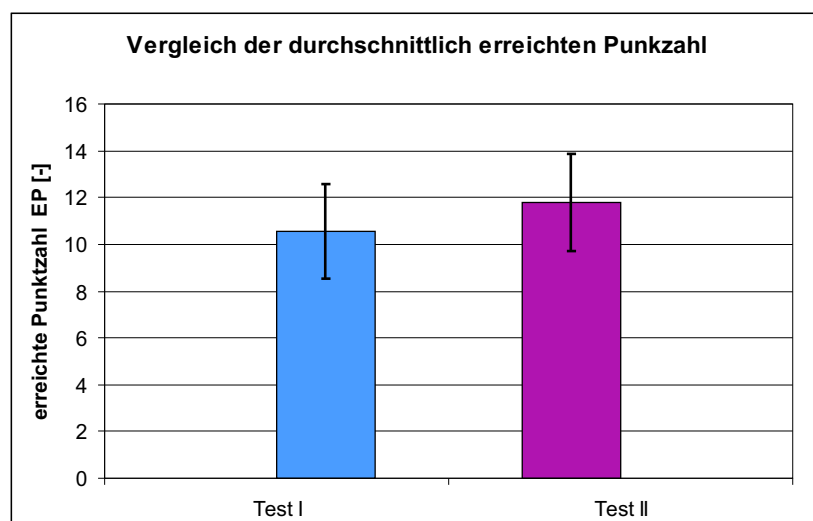


Abbildung A.15: In den Testformularen durchschnittlich erreichte Punktzahl EP

Literaturverzeichnis

- [AE97] R. Anderl and M. Endres. Perspektiven von STEP Anwendungen im Maschinenbau. In *VDMA: STEP in der Praxis*. Maschinenbau Verlag, Frankfurt, 1997.
- [Aer04] AeroShell. *The AeroShell Book*, März 2004. <http://193.113.209.166/aeroshell/aeroshellhydraulicfluids.pdf>.
- [ANS] ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania. *Ansys Theory Manual*.
- [Ben89] Hans et al.: Benninghaus. *Statistik für Soziologen 1: Deskriptive Statistik*. Teubner Studienskripte, Stuttgart, 1989. ISBN 3-499-55551-4.
- [BL91] Rainer Bokranz and Kurt Landau. *Einführung in die Arbeitswissenschaft*. Eugen Ulmer GmbH & Co, Stuttgart, 1991. ISBN 3-8001-2627-3.
- [Blu98] A. Blumstengel. Entwicklung hypermedialer Lernsysteme. Dissertation, Wissenschaftlicher Verlag Berlin, 1998.
- [Bol77] Richard Boll. *Weichmagnetische Werkstoffe*. Vacuumschmelze GmbH, Hanau, 1977. ISBN 3-8009-1240-6.
- [Bro89] Klaus Brockhoff. *Forschung und Entwicklung : Planung und Kontrolle, 2., erg. Aufl.*. Oldenbourg, München, 1989. ISBN 3-486-21273-7.
- [Bro97] I. N. Bronstein. *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1997.
- [Bru04] Ralph Bruder. *Einführung in die Ergonomie für Industrial Design*. Fachgebiet Ergonomie, Universität -GH Essen, Essen, 2004. Vorlesungsumdruck.
- [Bur96] Grigore Burdea. *Force and Touch Feedback for Virtual Reality*. Wiley Interscience, New York, 1996. ISBN 0-471-02141-5.

- [BW96] H.-J. Bullinger and J. Warschat. *Concurrent Simultaneous Engineering Systems*. Springer Verlag London Limited, London, 1996. ISBN 3-540-76003-2.
- [BZ00] Achim Bühl and Peter Zöfel. *SPSS Version 10 - Einführung in die moderne Datenanalyse unter Windows*. Addison-Wesley Publishing Company, München, 2000. ISBN 3-8273-1673-1.
- [CCR02] CCR. LMS Virtual.Lab für die Entwicklung mechanischer Systeme. In *CAD-CAM Report Februar 2002*. Dressler Verlag, Heidelberg, 2002.
- [Die98] Andreas Diekmann. *Empirische Sozialforschung: Grundlagen, Methoden, Beispiele*. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Hamburg, 1998. ISBN 3-499-55551-4.
- [Dör98] Kai-Uwe Dörr. Aufbau eines interaktiven virtuellen Cockpits und dessen Integration an eine bestehende Flugsimulation. Studienarbeit am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, Technische Universität Darmstadt, 1998.
- [Dör04] Kai-Uwe Dörr. Aufbau und Evaluation eines immersiven computerbasierten Trainingssystems in der Pilotenausbildung. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2004.
- [EBL95] W. Eversheim, W. Bochtler, and L. Laufenberg. *Simultaneous Engineering - von der Strategie zur Realisierung, Erfahrungen aus der Industrie für die Industrie*. Springer Verlag, Heidelberg, 1995. ISBN 3-486-21273-7.
- [Ede95] W. Edelmann. *Lernpsychologie*. Psychologie-Verlags-Union, Weinheim, 1995.
- [EKD00] H.-F. Eckey, R. Kosfeld, and C. Dreger. *Statistik: Grundlagen, Methoden, Beispiele*. Gabler, Wiesbaden, 2000. ISBN 3-409-22701-6.
- [Eng01] Kai Engels. Realisierung und Untersuchung der Kommunikationsstruktur einer Simulationsarchitektur für einen verteilten Forschungssimulator. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Shaker Verlag, Aachen, 2001. ISBN 3-8265-8727-8.
- [Fis03] Jan Fischer. *Simultaneous Engineering - Senken der Produktkosten durch integratives Projektmanagement*. <http://gkp-online.de>. Stand vom 22.04.2003, 2003. Herausgegeben von der Gesellschaft für kostenorientierte Produktentwicklung (GKP).

- [GKR00] E. Göde, A. Kaps, and A. Ruprecht. Entwicklung von Wasserturbinen am Virtuellen Prüfstand. In Schweizer Maschinenmarkt, editor, *SMM*, number 32/33, pages 10–15. Fachpresse Zürich, Zürich, 2000.
- [HJ02] W. Hussy and A. Jain. *Experimentelle Hypothesenprüfung in der Psychologie*. Hogrefe, Göttingen, 2002. ISBN 3-8017-1627-9.
- [HSH01] W. Hager, K. Spies, and E. Heise. *Versuchsdurchführung und Versuchsbericht - Ein Leitfaden*. Hogrefe Verlag für Psychologie, Göttingen, 2001. ISBN 3-8017-1418-7.
- [Hus99] Carsten Huschka. Die Bedeutung des Force Feedbacks für Virtual Reality Anwendungen. Studienarbeit am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, Technische Universität Darmstadt, 1999.
- [Kar94] Kennet Karlsson. Ein interaktives System zur visuellen Analyse von Simulationsergebnissen. Dissertation, Technische Hochschule Darmstadt, Shaker Verlag, Aachen, 1994. ISBN 3-8265-0399-6.
- [KCS00] R. Kress, P.-Y. Crepin, and M. Schreiber. „Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Parameteridentifikation für einen Linearmotor“. Abschlussbericht, TU-Darmstadt, 2000.
- [KCv02] W. Kubbat, P.-Y. Crepin, and V. van Lier. „Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Aktuator-Diagnosesystem/Toolkette Aktuator“. Fördernummer 20f9901b im Luftfahrtforschungsprogramm II des BMWi, Online Publikation, Darmstadt:, 2002.
- [KKR99] F.-L. Krause, Chr. Kind, and Chr. Raupach. Prozeßoptimierung in der Produktentstehung. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug und Verkehrstechnik, editor, *Virtuelle Produktentstehung in der Fahrzeugtechnik*, number 1489, pages 63–86. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [Kli95] Uwe Klingauf. Untersuchung der Systemdynamik eines fehlertoleranten elektrohydraulischen Stellantriebs mit Direct-Drive-Ventil (DDV). Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Düsseldorf, 1995. ISBN 3-18-354708-2.
- [Koh81] L.L. Kohnhorst. Direct digital drive actuation. *AIAA Paper 81-2298*, pages 400–408, 1981.

- [Kre02] Richard Kress. „Robuste Fehlerdiagnoseverfahren zur Wartung und Serienabnahme elektrohydraulischer Aktuatoren“. Dissertation an der Technischen Universität Darmstadt, Online Publikation, LHB Darmstadt, 2002.
- [KWGK00] J. Kaltenbach, H. Werries, Ü. Gazyakan, and H. Knödler. Entwicklungsprozess für ein mechatronisches System am Beispiel Steer-by-wire. In VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, editor, *Mechatronik - Mechanisch/Elektrische Antriebstechnik*, number 1533, pages 385–401. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [LR00] G. Lienert and U. Raatz. *Testaufbau und Testanalyse*. Psychologie Verlags Union, Weinheim, 2000. ISBN 3-621-27120-1.
- [Luc93] Holger Luczak. *Arbeitswissenschaft*. Springer Verlag, Berlin, 1993. ISBN 3-540-54636-7.
- [MC94] T. Malone and K. Crowston. The interdisciplinary Study of Coordination. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug und Verkehrstechnik, editor, *ACM Computing Surveys*, Vol. 26, number 1, pages 87–119. Association for Computing Machinery, 1994.
- [Mec01] Oliver Meckel. Analyse einer permanenterregten bürstenlosen Gleichstrommaschine. Studienarbeit, Technische Universität Darmstadt, 2001.
- [Meu01] Michael Meuter. Untersuchungen zur stereoskopischen Wahrnehmung mit einem kollimierten, durchsichtfähigen Head-Mounted Display. Diplomarbeit am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, Technische Universität Darmstadt, 2001.
- [Mil56] G.A. Miller. The number seven plus or minus two: Some limits on our capacity of processing information. In *Psychological Review*, number 63, pages 81–97. <http://www.well.com/user/smali/miller.html>, 1956.
- [MSC] MSC.Software GmbH, München. *MSC.Adams 2003*.
- [Olb00] Michael Olbert. Physical Illumination Simulation in Aircraft Cabins using CAD-Data and Real-Time VR. Studienarbeit am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, Technische Universität Darmstadt, 2000.
- [Par01] M. Pargfrieder. Sprachgesteuerte Möglichkeiten der Navigation und Interaktion in virtuellen Welten. Diplomarbeit am Institut für Medientechnik und -design, FH Hagenberg, 2001.

- [Rit03] Olaf Ritter. Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts zur Verbesserung der Interaktion im Rahmen einer virtuellen Funktionsprüfung eines elektrohydraulischen Aktuators. Diplomarbeit am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, Technische Universität Darmstadt, 2003.
- [Rot01] Gerhard Roth. Kognition: die Entstehung von Bedeutung im Gehirn. In *Emergenz : die Entstehung von Ordnung, Organisation und Bedeutung*, pages 104–133. Suhrkamp, Frankfurt a.M., 2001. ISBN 3-518-28584-X.
- [RP01] A. Riegler and M. Peschl. Virtual Science: Virtuality and Knowledge Acquisition in Science and Cognition. In Organismus und System Schriftenreihe des Wiener Arbeitskreises für Systemische Theorie des Organismus, editor, *Virtual Reality - Cognitive Foundations, Technological Issue and Philosophical Implications*, pages 9–32. Peter Lang GmbH, Frankfurt a.M., 2001. ISBN 3-631-38345-2.
- [Rya99] R.R. Ryan. Digital Testing in the Context of Digital Engineering “Functional Virtual Prototyping“. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug und Verkehrstechnik, editor, *Virtuelle Produktentstehung in der Fahrzeugtechnik*, number 1489, pages 163–185. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [Sah93] Heinz Sahner. *Schließende Statistik*. B. G. Teubner, Stuttgart, 1993. ISBN 3-519-20023-6.
- [SB02] Stephan Schwan and Jürgen Buder. Lernen und Wissenserwerb in virtuellen Realitäten. In Internet und Psychologie, editor, *In G. Bente, N. C. Krämer & A. Petersen (Hrsg.), Virtuelle Realitäten*, number 5, pages 109–132. Hogrefe Verlag für Psychologie, Göttingen, 2002. ISBN 3-8017-1465-9.
- [Sch96] R. Schulmeister. *Grundlagen hypermedialer Lernsysteme: Theorie - Didaktik - Design*. Addison-Wesley, New York, 1996.
- [Sch00] Jens Schiefele. Realization and Evaluation of Virtual Cockpit Simulation and Virtual Flight Simulation. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Shaker Verlag, Aachen, 2000. ISBN 3-8265-7873-2.
- [SL01] Brigitte Steinheider and Georg Legrady. *Kooperation in interdisziplinären Teams in Forschung, Projektentwicklung und Kunst*. Herausgegeben vom Fraunhofer Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation (IAO), Stuttgart, 2001. <http://mc.informatik.uni-hamburg.de/konferenzbaende/mc2001/V17.pdf>. Stand Juli 2003.

- [Spu96] J. H. Spurk. *Einfuehrung in die Theorie der Strömungen*. Springer Verlag, Berlin, 1996. ISBN 3-540-61308-0.
- [The] TheMathworks GmbH, Aachen. *Virtual Reality Toolbox*. http://www.mathworks.de/access/helpdesk/help/pdf_doc/vr/vr.pdf.
- [vD00] Andries van Dam. Keynote Address, Immersive Virtual Reality for Scientific Visualization: A Progress Report. *IEEE Computer Science: Virtual Reality 2000 Conference*, page 1, 2000. ISBN 0-7695-0478-7.
- [Vin95] John Vince. *Virtual Reality Systems*. Addison-Wesley Publishing Company, Bonn, 1995. ISBN 0-201-87687-6.
- [vLNK02] V. van Lier, R. Natchev, and W. Kubbat. Entwicklung einer virtuellen Testumgebung zur funktionalen Performanceprüfung am digitalen Prototypen eines elektrohydraulischen Aktuators. In ASIM Arbeitsgemeinschaft Simulation, editor, *FS 16, Simulationstechnik, 16. Symposium in Rostock*, number 16, pages 290–296. Society for Modeling and Simulation International, Erlangen, 2002. ISBN 3-936150-19-2.
- [VR93] 2221 VDI-Richtlinien. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, 1993.
- [Web98] Julian Weber. *Ein Ansatz zur Bewertung von Entwicklungsergebnissen in Virtuellen Szenarien*. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 1998. ISSN 0724-4967.
- [Wer94] Josie Wernecke. *The Inventor Mentor*. Addison-Wesley, New York, 1994. ISBN 0-201-62495-8.
- [Wes87a] R. Westermann. *Strukturalistische Theorienkonzeption und empirische Forschung in der Psychologie*. Springer, Berlin, 1987. ISBN 3-5401-8245-4.
- [Wes87b] R. Westermann. Wissenschaftstheoretische Grundlagen der experimentellen Psychologie. In *In G. Lüer (Hrsg.), Allgemeine experimentelle Psychologie*, pages 5–42. G. Fischer, Stuttgart, 1987.
- [WMW96] J. Wann and M. Mon-Williams. What does virtual Reality NEED?: human factors issues in the design of three-dimensional computer environments. In *Int. J. Human-Computer Studies*, number 44, pages 829–847. Academic Press Limited, , 1996.

- [Woj99] L. Wojcik. CAD-Technologie Qualitätssicherung von Geometriedaten für die digitale Produktentwicklung. In *CAD-CAM Report 023*, pages 112—115. Dressler-Verlag, Heidelberg, 1999.
- [WS00] J. Wulf and J. Schuller. Entwicklungsmethodik für mechatronische Karosseriesysteme. In VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb, editor, *Mechatronik - Mechanisch/Elektrische Antriebstechnik*, number 1533, pages 182–198. VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [YHL91] M.H. Hsu Y.N. Hsu, C.Y. Lai and Y.K. Lee. Development of the DDV actuation system on the IDF aircraft. In *Proceedings of the International Pacific Air and Space Technology Conference and 29, Aircraft Symp.*, 1991.
- [Zie99] Heike Ziegler. Virtuelle Realität: Neue Werkzeuge im Umgang mit Digitalen Prototypen. In VDI-Gesellschaft Fahrzeug und Verkehrstechnik, editor, *Virtuelle Produktentstehung in der Fahrzeugtechnik*, number 1489, pages 153–160. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1999.

Lebenslauf

Name:	Volker van Lier
Geburtsdatum:	3. Juni 1973
Geburtsort:	Lauffen/Neckar
1979 -- 1983:	Grundschule Wald-Michelbach
1983 -- 1992:	Gymnasium Wald-Michelbach
Okt. 1992 -- Sept. 1999:	Studium an der Technischen Universität Darmstadt, Fachrichtung Maschinenbau
Sept. 1999 -- Juni 2004:	Wissenschaftlicher Mitarbeiter, TU Darmstadt, FG Flugsysteme und Regelungstechnik
seit 01. Juli 2004:	Entwicklungsingenieur im Bereich „Entwicklung Software Produkte und Dienstleistungen“ bei der Continental Teves AG
Veröffentlichungen:	
2000:	<i>Neue Konzepte für elektrohydraulische Aktuatoren der primären Flugsteuerung</i> , thema FORSCHUNG, 1/2000
2002:	<i>Aktuator-Diagnosesystem, Toolkette Aktuator</i> , Abschlussbericht, Elektronische Publikation an der TIB Hannover, 2002
2002:	<i>Entwicklung einer virtuellen Testumgebung zur Performanceprüfung am digitalen Prototypen eines elektrohydraulischen Aktuators</i> , ASIM 2002, Rostock